

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЙ**

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
д.т.н., профессор Л.Н. Степанова

Новосибирск–2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
Глава 1 Анализ используемых методик акустико-эмиссионных исследований металлических материалов и изделий и возможности их внедрения в системы определения ресурса.....	15
1.1 Изменения потоковых параметров акустической эмиссии развивающихся дефектов при механическом нагружении .....	16
1.2 Исследования поведения основных параметров сигналов акустической эмиссии при деформировании металлов.....	22
1.3 Методики локации источников сигналов акустической эмиссии..	30
1.4 Методики идентификации источников акустической эмиссии....	34
1.5 Возможности оценки ресурса металлических изделий с использованием метода акустической эмиссии.....	41
Вывод по первой главе.....	51
Глава 2 Исследование дефектности литых деталей тележек вагонов и факторов, снижающих их надежность.....	54
2.1 Исследование напряжений в литых деталях, возникающих в процессе эксплуатации.....	55
2.2 Анализ дефектности боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов.....	67
2.3 Исследования причин разрушения литых деталей тележки грузовых вагонов.....	86
Выводы по второй главе.....	93
Глава 3 Моделирование параметров акустической эмиссии в деформируемых изделиях .....	96
3.1 Постановка задачи совершенствования системы контроля литых деталей за счет внедрения АЭ метода .....	96
3.2 Моделирование актов акустической эмиссии деформируемого материала и их параметров.....	104

3.3	Некоторые аспекты изменений параметров акустической эмиссии при деформировании реального металлического объекта ....	119
	Вывод по третьей главе .....	127
Глава 4	Исследование поведения основных характеристик акустической эмиссии развивающихся дефектов в образцах из низкоуглеродистой и низколегированной стали .....	129
4.1	Исследования параметров сигналов акустической эмиссии в образцах без концентраторов.....	129
4.2	Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах из низкоуглеродистых сталей с концентраторами при статическом растяжении.....	138
4.2.1.	Анализ потоковых характеристик акустической эмиссии при статическом растяжении образцов с концентратором.....	141
4.2.2.	Экспериментальное исследование изменения индивидуальных параметров сигналов при деформировании образцов с концентраторами .....	149
4.3	Исследование параметров акустической эмиссии при циклическом нагружении образцов с концентраторами .....	158
4.4	Влияние комплексного исследования с использованием циклического и статического нагружения на параметры сигналов акустической эмиссии .....	163
	Выводы по четвертой главе.....	176
Глава 5	Методические аспекты выбора основных параметров акустико-эмиссионного контроля литых деталей.....	179
5.1	Анализ погрешностей определения координат источников сигналов акустической эмиссии в литых деталях .....	180
5.2	Методика выбора способа определения координат источников дискретных сигналов акустической эмиссии .....	187
5.3	Анализ погрешностей определения координат источников при комбинированном способе обработки акустико-эмиссионный	

информации.....	194
5.4 Оценка чувствительности каналов акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек вагонов.....	205
5.5 Разработка методики акустико-эмиссионного контроля литых деталей с повышенной чувствительностью в отдельных участках.....	213
Выводы по пятой главе.....	222
Глава 6 Анализ результатов акустико-эмиссионного контроля литых деталей с различной дефектностью.....	224
6.1 Основные параметры акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов.....	224
6.2 Анализ критериев оценки технического состояния литых деталей для акустико-эмиссионного метода .....	234
6.2.1. Анализ потоковых параметров от активных источников....	237
6.2.2. Анализ поведения коэффициента корреляции у различных источников акустической эмиссии в литых деталях.....	242
6.2.3. Исследование изменения суммарной энергии сигналов акустической эмиссии активных источников.....	245
6.3 Методика идентификации источников акустической эмиссии на литейных дефектах в литых деталях.....	248
6.4 Исследование поведения параметров сигналов акустической эмиссии, излучаемой из участков, отремонтированных сваркой и наплавкой .....	257
6.5 Экспериментальные исследования поведения параметров акустической эмиссии при повторных испытаниях литых деталей.....	272
Выводы по шестой главе.....	284
Глава 7 Применение акустико-эмиссионного метода для прогнозирования поведения литых деталей при их эксплуатации.....	287
7.1 Разработка модифицированной интегральной методики оценки состояния литых деталей.....	288
7.1.1 Использование акустико-эмиссионного контроля для	

определения последующего срока эксплуатации литых деталей.....	288
7.1.2 Применение тензометрии совместно с акустико- эмиссионным методом при оценке ресурса деталей .....	300
7.2 Разработка вероятностной модели оценки ресурса с использованием распределения Вейбулла .....	303
7.3 Экспериментальные исследования характеристик сигналов акустической эмиссии как элементов вероятностной модели оценки параметров ресурса объектов контроля.....	312
7.4 Анализ применения вероятностного способа оценки ресурса для литых деталей тележек грузовых вагонов .....	323
Выводы по седьмой главе .....	330
Заключение .....	332
Библиографический список .....	336
Приложение.....	370

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Контроль состояния различных технических объектов и, в частности, деталей на разных стадиях производства, эксплуатации и ремонта требует изучения процессов формирования дефектов и динамики изменения их параметров для обеспечения наиболее эффективного функционирования этих объектов с минимальными экономическими затратами. Использование любого метода неразрушающего контроля (НК) предполагает проведение глубоких теоретических и экспериментальных исследований при встраивании этого метода в систему технического контроля. Кроме того, важное значение имеет задача оценки остаточного ресурса с использованием тех же средств и методов НК, что позволяет добиться эффекта как с технической, так и с экономической точки зрения.

Современные методы 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. Наличие сложной формы и, как следствие, сильной неравномерности напряженного состояния в процессе эксплуатации, различные типы литейных дефектов для большинства методов НК не позволяют с необходимой достоверностью оценивать текущее состояние и тем более остаточный ресурс таких объектов. Кроме того, подобного рода объекты (сложная форма, неоднородность структуры, неравномерное по времени изменение напряженно-деформированного состояния в разных локальных участках объекта, изменение геометрических размеров в процессе эксплуатации вследствие износов) являются наиболее обобщенным случаем в практике НК и оценки ресурса и в этой связи представляют науч-

ный интерес при решении задачи диагностирования объектов сложной формы, переменной толщины и неоднородной структуры.

В мире существует большой объем научных знаний о физическом состоянии различных материалов, их физических свойствах и динамике изменения структуры и свойств в процессе статического и динамического нагружения, а также накопления повреждений. Одним из наиболее перспективных и динамически развивающихся методов в этом направлении является метод акустической эмиссии (АЭ). Исследования возможностей АЭ метода с использованием современной быстродействующей аппаратуры позволяют приступить к разработке методологических подходов функционирования систем технической диагностики, направленных на контроль технического состояния деталей в процессе их жизни, а также проводить оценку остаточного ресурса или срока службы деталей, конструкций узлов и механизмов. В свою очередь, современные знания в области приборостроения и создания аппаратуры для НК позволяют решать задачи практического моделирования, создания и использования таких систем.

Разработка подходов к контролю состояния объектов литейного производства в течение всего цикла их эксплуатации требует большого объема теоретических, экспериментальных и прикладных исследований на примере распространенных типов литых объектов массового производства, позволяющих обобщить 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 металлических объектах. К российским исследователям и специалистам ближнего зарубежья, внесшим наибольший вклад в знания о явлении АЭ, относятся такие ученые, как А. Е. Андрейкив, В. М. Баранов, 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, 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 Н. L. Dunegan, D. O. Harris, M. A. Hamstad, K. Ono, C. V. Scruby, H. N. G. Wadley и другие.

В настоящее время 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. Безусловно, в процессе работы с такими изделиями и конструкциями исследователи сталкиваются с рядом проблем, основными из которых для методов НК являются:

- различная контролепригодность разных 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.

Кроме того, есть объекты, оценка технического состояния которых, в том числе АЭ методом, затруднена дополнительными, снижающими контролепригодность факторами. Таким фактором является, в частности, неоднородность механических и физических свойств, которые присущи литым деталям. Для деталей сложной формы применение любого акустического метода дополнительно осложнено изменением направления и параметров акустического тракта от источников до приемников.

Применение метода АЭ для определения необратимых процессов в металлических объектах сложной формы является одним из самых перспективных в контексте обозначенных проблем. Постоянное развитие современной микропроцессорной техники приводит к появлению новой АЭ аппаратуры с большими возможностями, использование которой и наиболее адекватный выбор параметров контроля для нее должны быть теоретически и экспериментально обоснованы.

**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 локализации 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 напряжениями 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<sup>2</sup> и более, составляющих от 0,1 % площади сечения в литых деталях сложной конструкции.

Установлено, что разные типы источников (упругие и пластические деформации, трещины на разных стадиях развития, дефектные структуры металла) 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 конференции 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, 18 статей и докладов, десять 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.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МЕТОДИК АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА**

Метод АЭ нашел широкое применение для диагностирования большого числа объектов в различных технологических случаях:

- при поиске локальных разрушений наиболее значимые работы в этом направлении [1–5];
- при поиске течей в объектах, к которым предъявляются требования герметичности [5, 6];
- процесса сварки и результатов сварки и наплавки при остывании металла [7, 8];
- процессов трения узлов механизмов [9].

Большой объем этих работ посвящен исследованию поведения АЭ либо в образцах, либо в объектах относительно простой формы, например, сосудов, труб. Основным же назначением метода является отыскание источников АЭ – потенциальных мест разрушения, к которым традиционно относят: трещины, участки пластической деформации, коррозионные растрескивания [5, 10]. Вместе с тем метод АЭ имеет наряду с неоспоримыми достоинствами ряд существенных недостатков, к которым относятся:

- высокий уровень помеховых сигналов дискретной АЭ [11], своевременное распознавание которых и исключение из рассмотрения является важной задачей даже для объектов простой формы и относительно однородного структурного состояния, не говоря об объектах более сложной формы и неоднородной структуры;
- большое число параметров АЭ, в том числе производных характеристик [10, 12], существенно осложняющих выбор значимых, при диагностике изделий;

– прямая зависимость регистрируемой АЭ информации от параметров нагружения [13, 14] и, как следствие, необходимость оценки или учета напряжений в материале, что для неравномерно нагруженных объектов и объектов сложной формы существенно затрудняет процедуру диагностики;

– влияние различных искажений сигнала в акустическом канале (структура и форма материала, искажение сигнала при преобразовании и усилении и т. д.), которое, в свою очередь, также затрудняют локацию источников, этот процесс подробно описан в монографии [15].

Для повышения достоверности АЭ метода эти и некоторые другие проблемы требуют разрешения как инструментальными способами, так и методически.

### **1.1. Изменения потоковых параметров акустической эмиссии развивающихся дефектов при механическом нагружении**

Исследования потоковых характеристик АЭ проводятся с самых первых попыток применения метода в середине прошлого века. Однако и современные исследователи продолжают изучение этих параметров в разных материалах и условиях на АЭ аппаратуре, позволяющей регистрировать волновые пакеты сигналов и обрабатывать их. Все проводимые исследования можно разделить на два направления:

– анализ традиционных потоковых параметров, таких как суммарный счет, активность при АЭ, возникающей от характерных смоделированных источников;

– поиск производных потоковых характеристик, которые имеют связь с развивающимися источниками и повышают достоверность оценки состояния объекта.

Проанализируем наиболее значимые работы в первом направлении.

В работе [16] по скорости роста суммарного счета АЭ судят об оптимальной вязкости разрушения в стали P18. Материал, обладающий максимальной вязкостью разрушения, излучает меньше сигналов АЭ. Однако при этом подразумевается одинаковость параметров настройки АЭ системы, что в реальных условиях для многих объектов является трудно выполнимым условием.

Авторы работы [17] исследовали АЭ в объектах из низкоуглеродистой стали. Амплитудные распределения сигналов имеют практически равномерный вид, однако стоит отметить, что разрушение происходит с незначительным выделением энергии, т. е. при разрушении образца возникает большое количество источников разрушения и энергия, излучаемая дефектами, распределяется на все образовавшиеся источники. Об этом можно судить, сравнивая выделение энергии от активных источников АЭ с общим количеством запасенной энергии за все испытание.

Исследования, проведенные Д. Ю. Зубенко [18], показывают, что исходя из физической природы разброса значений долговечности, полную диаграмму усталостного разрушения исследуемых деталей можно рассматривать как семейство диаграмм усталости деталей, имеющих одинаковое техническое состояние. Иными словами, каждой конкретной детали соответствует определенная кривая усталости. При таком подходе случайными будут свойства конкретной детали, а ее долговечность уже становится величиной детерминированной, обусловленной предысторией детали. Из этого следует, что интенсивность потока АЭ в материале при фиксированном уровне напряжения, отражает интенсивность деформационных процессов, и таким образом дает информацию об усталостной прочности контролируемого изделия.

В работе [19] рассмотрена методика диагностики состояния конструкции, состоящей из стержневых элементов. Автор предлагает для диагностирования потенциально опасного участка использовать установку одного резонансного преобразователя и по суммарному счету и активности судить о состоянии конструкции. При этом оценка состояния элемента проводится пороговым способом.

Авторы патента [20] показывают, что при плавном нагружении изделия в области упругих деформаций следует проводить регистрацию числа импульсов АЭ и величины нагрузки, измерения размеров изделия, определения зависимости напряжений в материале от времени, распределение структурно-чувствительного параметра по объему материала. Дальнейшая аппроксимация экспериментальной зависимости числа импульсов АЭ от времени по определенной теоретической кривой позволяет находить предел прочности материала изделия из соответствующего уравнения.

В работах группы ученых [21, 22] исследованы потоковые параметры АЭ в деталях подшипников. В результате экспериментов авторами обнаружена связь между размерами дефектов в дорожке качения и активностью АЭ, а также получена линейная зависимость длительности зарегистрированных сигналов с длиной дефектов.

Авторами статьи [23] определены информативные параметры сигналов АЭ при процессах коррозии в стали 09Г2С. К характерным АЭ проявлениям коррозионно-механического процесса можно отнести регистрацию сигналов АЭ с большой длительностью, реализующихся пакетами с большим числом импульсов (суммарным счетом сигнала АЭ). Установлено, что активный коррозионный процесс отличается от менее активного по увеличению суммарного счета сигналов АЭ одновременно с увеличением их длительности при небольшой разнице в амплитудах относительно начальной стадии. Амплитуды сигналов АЭ при коррозионном процессе стали 09Г2С достаточно большие, что позволяет регистрировать сигналы от коррозии на большом удалении от источников.

По результатам исследований, проведенных в КомГУ [24–26], выделены три стадии развития деформации в образцах из алюминиевого сплава Д16АТ с круглыми концентраторами и надрезами. Выделенные стадии соответствуют различным уровням деформационных процессов. Первая стадия совпадает с упругой деформацией и началом пластической и характерна локальными динамическими изменениями структуры на микроуровне. Вторая стадия совпадает с процессами,

протекающими на мезоуровне, а последняя – с образованием и развитием макродефекта в виде трещины.

В работе [27] показано, что суммарный счет в образцах из легированной стали 07X16H6 связан с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) и описывается степенной зависимостью. Кроме того, проведенные эксперименты на образцах разной толщины показали, что толщина образцов влияет на амплитудное распределение сигналов АЭ на финальной стадии развития трещины, когда амплитуды достаточно велики. Более толстые образцы имеют распределение сигналов по амплитудам, близкое к экспоненциальному, в то время как у тонких образцов максимум сдвинут из области минимальных амплитуд.

В работе [28] рассмотрены изменения параметров АЭ в образцах из титановых сплавов при статическом растяжении, а также подробно изучен механизм деформирования и разрушения этого материала. Характерно, что повышение амплитуд сигналов в образцах без концентраторов происходит только в упругой области деформирования, все больше концентрируясь в области дальнейшей пластической деформации, затем сигналов разделяются на две категории: высокоамплитудные и низкоамплитудные. При деформировании образцов с концентратором активность и средняя амплитуда сигналов АЭ повышается на всем протяжении испытаний.

Анализ водородной повреждаемости в работе [29] выявил два временных интервала термического наводороживания металла с превалирующим развитием деградационных и деструктивных процессов в низкоуглеродистых сталях. Внутри этих временных интервалов развиваются процессы повреждаемости двух различных масштабных уровней. В области I (деградация) превалирует над накоплением объемных микроискажений за счет роста количества диффундирующего и акклидированного водорода. Рост концентрации водорода ведет к увеличению количества активизирующихся коллекторов. При нагружении насыщенных (5 ч) образцов регистрируемые сигналы АЭ соответствуют активной генерации и движению дислокаций. Резкое снижение перечисленных процессов отмечено после насыщения в течение 10–15 ч.

Освещенные работы уделяют внимание таким распространенным потоковым параметрам, как суммарный счет АЭ и активность, изменения которых при деформировании материалов свидетельствуют о развитии трещин или пластической деформации. Авторы, исследуя закономерности изменения этих параметров, судят о состоянии материала. Однако, как утверждает С. И. Буйло в ряде работ, в том числе в статье [30], анализ потоковых характеристик при повышенной активности АЭ (как следствие – при потере части информативных данных при испытаниях) приводит к искажению получаемых результатов. Поэтому С. И. Буйло предлагает для оценки величины этих потерь использовать прореживание потока методом инвариантов, в том числе шумового. Такой способ обработки АЭ данных необходим для оценки необратимых потерь сигналов АЭ и применения способов восстановления суммарного счета или активности [31, 32].

В ряде случаев исследователи пытаются связать параметры АЭ с известной характеристикой состояния трещин – КИН. Так, в работе [33] проведен анализ изменений активности АЭ в образцах из алюминиевого сплава Д16АТ с искусственными концентраторами (пропилами) различной длины при статическом растяжении. Результаты показывают, что малые размеры концентраторов, т. е. низкий начальный КИН приводит к малой активности, которая увеличивается медленно и лишь на стадии роста сформировавшейся магистральной трещины происходит резкое увеличение активности сигналов АЭ, которое продолжается до разрушения. Увеличение же размеров концентратора ведет к повышению активности, в том числе на ранних стадиях деформации. Результаты показывают, что важную информацию о концентраторе несет активность на всех этапах испытаний, даже на начальном.

В качестве информативного параметра В. В. Носов в работе [34] вводит временные интервалы между сигналами АЭ. В его работах описаны статистические параметры сигналов АЭ, такие как распределения амплитуд и частот и длительности пауз между сигналами. Рассмотрены средние квадратичные отклонения (СКО) приведенных параметров, эллипсы рассеяния в контексте прогнозирования дальнейшей работоспособности металлических ОК [35]. Более того, В. В. Носо-

вым были предложены интегральные критерии оценки на основе потоковых параметров. В статье [36] предложена эмпирическая модель оценки прочности сварных конструкций металла. Автор предлагает в качестве основного параметра использовать концентрационно-кинетический показатель, который базируется на логарифмической связи с одним из параметров АЭ. Кроме того, концентрационно-кинетический показатель связывается с напряженным состоянием материала. В экспериментальной части работы показано, что концентрационно-кинетический показатель связан с суммарной амплитудой сигналов источника. Приведенный подход для оценки прочности металлоконструкций представлен в [37].

При исследовании АЭ, возникающей при деформировании образцов из разных марок сплавов, В. В. Корчевский [38] обнаружил, что при высокой чувствительности приемных преобразователей АЭ становится непрерывной. В результате эксперимента регистрировали непрерывную эмиссию, интенсивность которой имеет пик на участке перехода от упругой деформации к пластической. Автор делает вывод, что на стадии упругой деформации можно говорить о множественных источниках АЭ, распределенных по всей рабочей (деформируемой) поверхности.

Исследования О. Е. Сысоева, представленные в работе [39], были направлены на анализ потоковых параметров при циклических испытаниях. Экспериментальные данные в работе показывают, что энергия АЭ за цикл нагружения практически не изменяется на всем протяжении циклических испытаний образцов из стали 40Х и начинает возрастать только на конечной стадии испытаний перед разрушением.

Характерную черту современным исследованиям поведения потоковых характеристик АЭ подводят результаты, приведенные в статье [40]. В качестве диагностического параметра авторами были приняты такие потоковые параметры, как суммарная АЭ и спектральная плотность сигналов АЭ, распределение сигналов по частотам и энергии. Однако выводы показывают, что без фильтрации сигналов выделение источника по этим признакам весьма затруднительно даже в таком достаточно простом объекте, как котлы цистерн.

Обобщая приведенный обзор исследовательских работ, можно отметить, что основные и производные потоковые параметры безусловно связаны с параметрами развивающихся дефектов. Однако даже в образцах, когда местоположение концентраторов известно, следует подбирать параметры контроля, такие как чувствительность, размеры антенны и другие, которые влияют на потоковые параметры. Кроме того, потоковые параметры отражают состояние локальной области только в случае достоверного выделения сигналов источников на фоне прочих сигналов АЭ, что требует также применения методик достоверной локализации и фильтрации, изучение которых для литых деталей с неоднородной структурой и сложной формой требует новых методических подходов.

## **1.2. Исследования поведения основных параметров сигналов акустической эмиссии при деформировании металлов**

Важное значение в АЭ контроле имеет поведение отдельных параметров сигналов, по динамике изменения которых можно судить о целостности локальных участков и объекта в целом.

В первом приближении проводятся исследования поведения амплитуды и энергии сигналов АЭ в различных условиях нагружения – формы и размеров объектов диагностики – материала. В работе [41] показано, что на разных стадиях статического деформирования образцов из стали 09Г2С гистограммы распределения сигналов АЭ по энергии претерпевают заметные изменения, по которым можно судить о стадии деформирования, к тому же использование широкополосных датчиков дает возможность спектрального анализа, который также позволяет идентифицировать сигналы, регистрируемые на разных стадиях упругой и пластической деформации.

В статье [42] отмечается, что амплитудный критерий можно использовать только для одной измерительной системы с одними и теми же преобразователями. В противном случае результаты будут существенно искажаться. В работе общую степень поврежденности ОК определяют по изменению кривой спектральной плотности относительно исходной, полученной на бездефектном объекте.

Аналогичные исследования провели В. В. Муравьев и С. И. Тимков [43]. Они предложили судить о наличии дефектов по амплитудному критерию сигналов, принятых из одной области элементов колесной пары. Это одна из немногих работ, посвященных диагностированию объемного объекта.

Еще одним направлением исследований являются вопросы построения огибающих сигналов АЭ в процессе обработки и выделения полезной информации относительно шумов преобразователей [44].

Авторы статьи [45] считают, что при диагностировании металлического объекта решающий вклад в оценку состояния вносят амплитуда регистрируемых сигналов АЭ и активность, на основании изменения которых можно принимать решение о состоянии объекта при малоцикловых испытаниях.

В работе [46] В. В. Носов провел анализ амплитудного распределения сигналов АЭ для дефектных и бездефектных стальных конструкций со сварными соединениями. Результаты исследования показали, что наличие дефектов приводит к смещению пика числа сигналов в область больших значений амплитуд сигналов АЭ. Кроме того, зафиксировано смещение частотного распределения импульсов в сторону увеличения для дефектных деталей. Это означает, что формирование и развитие макродефектов характеризуется более высокими амплитудами и повышением несущей частоты колебаний.

В статье [47] В. Р. Скальского и О. С. Дубицкого параметры сигналов АЭ использованы для определения статической трещиностойкости рессорной стали. Авторы попытались связать результаты АЭ испытаний с КИН, а также применили вероятностный подход к оценке, что позволило несколько повысить надежность оценки статической трещиностойкости методами НК.

Однако в ряде работ указывается, что различные геометрические параметры объектов диагностирования существенно влияют на искажение характеристик записываемых сигналов АЭ. Так, в статье [48] исследовано влияние отражения ультразвуковых волн в виде сигналов АЭ от естественных препятствий в виде изменения сечения, краев, технологических отверстий и их наложения в реальных объектах диагностирования на амплитудное значение зарегистрированного сигнала. Проанализированы искажения спектральной составляющей сигналов АЭ в зависимости от толщины металла как волновода. При этом установлено, что все перечисленные параметры влияют на искажения амплитуды, энергии и распределения спектральной плотности сигналов АЭ. Те же авторы в статье [49] развили свои исследования в направлении влияния глубины залегания и вида разрушения на параметры сигнала АЭ с учетом диаграммы направленности, формируемой источником в объектах типа тонких пластин. Установлено, что указанные параметры дефектов, являющихся источниками АЭ, также влияют на параметры АЭ сигналов.

Нестабильность параметров сигналов АЭ привела В. Н. Овчарука [50] к выводу, что энергетические параметры следует определять только с помощью широкополосной аппаратуры и широкополосными преобразователями. В противном случае необходимо учитывать тот частотный диапазон, который позволяет регистрировать аппаратура. В связи с этим большое число работ посвящено исследованиям спектральных характеристик сигналов АЭ, полученных при разрушении материала.

В другой работе [51] тот же автор утверждает, что сигнал в целом и его отдельные параметры, в том числе частотные, в каждом отдельном акте АЭ будут индивидуальны и привязаны к размерам и характеру зоны единичного разрушения, вызвавшего акт АЭ. Из этого сделан вывод, что индивидуальные параметры сигналов в процессе испытаний будут весьма неравномерно распределены. Для частичной компенсации этой неравномерности при испытании металлических материалов В. Н. Овчарук предлагает усреднять амплитудно-частотное распределение в полосе 60 кГц.

Авторы работы [52] пошли дальше и показали, что существенное влияние на получение АЭ информации оказывают неравномерность амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), нестабильность коэффициента усиления, особенно для сигналов с низким соотношением амплитуды сигнала и шума. Поэтому повышение уровня сигнала относительно шумов резко повышает точность определения координат и устойчивость результатов АЭ испытаний металлических ОК.

В работе [53] приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований изменений АЧХ сигналов, полученных на образцах протяженной формы из различных материалов, в том числе из стали Ст3. Основной задачей исследования была оценка степени смещений спектральных характеристик сигналов АЭ от заданных параметров имитатора и расстояний, пройденных в объекте как волноводе. Результаты исследований демонстрируют, что даже в объекте простой формы спектральные характеристики могут существенно искажаться.

В еще одной статье [54] на основании анализа спектров сигналов АЭ выделили сигналы от перемещений дислокаций, образования микротрещин и продвижения макротрещины для стали 12Х18Н10Т. В этой работе также установлено, что увеличение числа фаз структуры материала повышает числа сигналов АЭ.

Исследователями в работе [55] рассмотрено влияние развивающихся трещин на амплитудно-частотное распределение зарегистрированных сигналов АЭ. О наличии внутренних и выходящих на поверхность трещин предлагается судить по дополнительным пикам, появляющимся в спектре сигналов АЭ. Исследования проводили при испытаниях на сплющивание образцов из стали 12Х1МФ, вырезанных из паропроводов как в исходном состоянии с различной структурой, так и паропроводов, отработавших различный срок.

Авторы работы [56] указывают, что спектральная плотность сигналов АЭ, зарегистрированных широкополосными преобразователями, изменяется в зависимости от вида термической обработки образцов, что связано с размерами структурных составляющих, испытывающих эти изменения.

В работе [57] исследованы образцы из стали 20 при растяжении, в том числе после малоциклового нагружения. Подробно исследованы спектры сигналов на

разных стадиях деформации и накопленного поврежденного состояния после малоциклового нагружения. Установлено, что по спектральным характеристикам (медиана частоты) можно выделить участки пластического деформирования и места сварных соединений.

В статье [58] В. Н. Овчарук утверждает, что использование вторичных параметров обработки АЭ информации, таких как средние амплитуды участков амплитудно-частотных спектров и их соотношение позволяет сортировать сигналы по степени значимости и природы актов АЭ. Таким образом автор решает проблему разделения сигналов АЭ в объектах, содержащих дефекты и в бездефектных ОК.

В работе [59] приводятся результаты исследований спектральных параметров сигналов АЭ и анализируется влияние диффузии водорода в области концентрации напряжений и развивающейся трещины в образцах из трубной стали 35Г2, в том числе методом АЭ. В процессе исследований зарегистрированы изменения спектральных характеристик сигналов на разных стадиях деформирования образцов. Методом АЭ авторы регистрировали изменения структурного состояния и прогнозировали параметры дальнейшей деградации структуры в области концентратора.

Однако и спектральные параметры искажаются в материале при прохождении сигнала, что видно из работы [60], авторы которой предлагают использовать для расчета акустического тракта волны, распространяемой от источника до приемников, метод конечных элементов. При этом авторы анализировали искажение АЧХ при прохождении волны в материале объекта диагностирования и в процессе преобразования. Полученные результаты были проверены экспериментально и достаточно хорошо совпали с расчетом.

Часть исследований посвящена обработке сигналов АЭ с помощью вейвлет-преобразования. Например, в работе [61] исследовали возможность применения вейвлет-анализа для идентификации различных источников АЭ. В работе [62] авторами для обработки сигналов использовали различные типы преобразования амплитудно-временного пакета сигнала, в частности Фурье- и вейвлет-

преобразования Хаара и Дебеша. Сигнал АЭ имеет характерные особенности в виде несколько резких всплесков, но на графике спектральной плотности виден резкий максимум в начале шкалы и множество локальных максимумов. Поэтому авторы считают, что для входных данных преобразование Фурье менее информативно, чем вейвлет-преобразование. Утверждение авторов спорно, как и во многих других случаях выбор функции обоснован только удачно согласующимися результатами эксперимента, а не логичной доказательной базой.

В работе [63] предложена методика определения частотного коэффициента, полученного на основе вейвлет-преобразования волновых пакетов зарегистрированных сигналов АЭ, который чувствителен к механизму формирования актов АЭ и позволяет выделять сигналы от развивающихся трещин от дислокационных перемещений в структуре стали.

Авторы статьи [64] выделяют четыре стадии пластической деформации материалов с концентраторами, которые четко разделяют по параметрам АЭ с использованием вейвлет-преобразования. Используя энергию сигналов и частотный коэффициент, полученный вейвлет-фильтрацией, в результате исследований выделены стадии микропластичности, текучести, упрочнения и трещинообразования. Исследования проведены на образцах с концентраторами из стали 12Х18Н10Т. При этом было отмечено, что двухфазные компоненты структуры излучают АЭ гораздо активнее однофазных компонентов.

Зарубежные исследователи также активно занимаются вопросами применения вейвлет-преобразования для анализа сигналов АЭ [65, 66]. Главным направлением в разрабатываемых методиках и результатах экспериментов является отыскание параметров преобразованных сигналов, коррелирующих с механическим состоянием объекта диагностирования, и идентификация сигналов от источников с целью автоматизации процесса выделения конкретных источников из общего потока сигналов.

Оригинальные исследования проведены в работе [67], в которой предлагается для повышения точности определения параметров обрабатываемой инфор-

мации проводить вейвлет-фильтрацию шумов, исключение которых позволяет повысить точность прогнозирования состояния объектов диагностирования.

В целом же вейвлет-анализ АЭ сигналов позволяет улучшать фильтрацию шумов, разделять акустические моды и решать задачу определения координат источников. Авторами работы [68] проведен расчет, и в аппаратуре реализована функция визуализации частотных зависимостей групповых скоростей и вейвлет-спектрограмм АЭ сигналов.

Следует отметить, что чаще всего исследователи применяют вейвлет-обработку без достаточного теоретического обоснования. Кроме того, для обработки используются разные функции, выбор которых также мало обоснован.

Еще одним направлением анализа отдельных параметров сигналов АЭ является направление кластеризации сигналов. Основные постулаты и параметры кластерного анализа были проанализированы еще в работе И. Д. Манделя [69], который определил также и способы оценки близости объектов, выделенных методом кластеризации.

В статье [70] приводится методика кластеризации источников АЭ по признакам сигналов АЭ. При этом нечеткая кластеризация по спектральным параметрам сигналов АЭ помогает идентифицировать источники, находящиеся в разных пространственных точках объекта. Недостатком работы является анализ сигналов не от реальных источников, а от имитатора.

В работе [71] использован кластерный анализ для идентификации источников на основании распределения индивидуальных параметров каждого отдельного сигнала АЭ. К значимым параметрам отнесены время нарастания сигнала АЭ, частота максимума спектра и др. Кроме того, в работе заданы критерии разбиения на кластеры с учетом степени различия значимых параметров. Такой подход применяется как дополнительная обработка к первичному аналитическому способу определения координат источников АЭ.

В следующей работе под руководством Л. Н. Степановой [72] представлены сравнительные методики кластеризации источников по параметрам сигналов АЭ. При этом методика кластеризации рассмотрена в сравнении с методиками класте-

ризации по скорости нарастания амплитуды сигналов и форме. В процессе исследований установлено, что кластеризация по форме дает наиболее положительный результат при повышении уровня шумов в ОК. Кроме расчетных данных представлены результаты экспериментов, проведенных на объекте плоской формы со сварными швами. Такая обработка позволяет выделять источники и анализировать потоковые параметры АЭ отдельных кластеров.

В работе [73] проведен кластерный анализ сигналов АЭ в процессе диагностирования сварного шва. В ходе анализа выделены опасные источники АЭ и проведен их металлографический анализ, который подтвердил наличие опасных дефектов, возникших при сварке стальных элементов.

Автор статьи [74] предлагает оригинальный подход к распознаванию сигналов, отличающийся от принципа работ нейронных сетей тем, что процедура обучения на базе методики случайного поиска отсутствует, а процесс распознавания базируется на принципе конструирования. Анализ деталей волновых пакетов и рациональное разложение класса сигналов на детали позволяет создать сложные и многогранные устройства распознавания.

Подводя итоги анализу использования индивидуальных параметров сигналов АЭ и динамики их изменения для оценки состояния объекта, можно сказать, что наиболее популярными являются:

- методики исследования спектральной плотности волновых пакетов сигналов АЭ;
- использование вейвлет-преобразования с применением различных функций;
- кластерный анализ по прямым и производным параметрам отдельных сигналов АЭ.

Все эти методики применимы в частных случаях, на конкретных объектах. Для изделий сложной формы необходим концептуальный подход хотя бы к выбору методики и последующей ее реализации. Однако большинство исследований проведено на образцах, когда есть возможность методически отсеять помеховые источники. В реальных объектах такая возможность затруднена и требует приме-

нения надежных методик локализации источников для последующей обработки сигналов, поступающих от них.

### **1.3. Методики локации источников сигналов акустической эмиссии**

В настоящее время наиболее разработанной методикой локализации источников является аналитический способ определения координат, подробно изложенный в работах [8, 15, 71]. Исследования в этом направлении продолжаются. Например, в работе [75] проанализирована возможность определения координат источников АЭ в кольцах подшипников подвижного состава железных дорог. Учитывая тот факт, что кольца подшипников имеют относительно малые размеры, авторами установлено, что это играет определяющую негативную роль для погрешности локализации источников.

В другой работе этого направления – [76] – проанализировано влияние основных параметров формулы аналитического определения координат источников для плоского объекта. Согласно исследованию погрешность определения координат аналитическим методом имеет квадратичную зависимость от изменения скорости ультразвуковой волны и требует определения среднего значения скорости, обеспечивающего минимальную погрешность локализации источников АЭ.

В статье [77] авторы установили, что погрешность определения координат источника существенно зависит от погрешности координат приемных преобразователей. Для повышения точности авторы предлагают в том числе увеличение частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) АЭ системы. Эти исследования проводили на стальном листе. При использовании резонансных преобразователей погрешность оказалась несколько выше, чем для широкополос-

ных. Кроме того, авторы выделяют проблему определения времени прихода сигналов в зависимости от принятой моды акустического сигнала.

В работе [78] приведена методика повышения точности локализации источников АЭ в объектах малых размеров, таких как кольца подшипников, когда зарегистрированные сигналы представляют собой наложение отдельных волновых пакетов. Авторы предлагают модифицированный двухинтервальный метод определения времени прихода сигналов АЭ, когда к регулярной составляющей сигнала АЭ добавляется составляющая, несущая случайный шум, описываемый нормальным распределением с математическим ожиданием, равным нулю. Полученные результаты показывают, что использование такого способа повышает точность локализации источников сигналов АЭ.

Другая группа исследователей расчетными методами изучала точность определения времени прихода сигналов АЭ и зависящую от этого точность определения координат источников [79]. Анализ показал, что двухинтервальный метод и его модификации обладают примерно одинаковой точностью при интервале суммирования (4...10) мкс. При увеличении интервала суммирования точность начинает снижаться.

В работе [80] исследовано влияние различных методических факторов на точность определения координат источников АЭ в листовой стали при плоскостной локации. В статье отмечено, что для листовых объектов следует учитывать изменение групповой скорости волн Лэмба при расчетном определении координат. Кроме того, установлено, что на точность определения координат влияет относительная чувствительность приемных преобразователей и размеры пьезоантенны.

Учет погрешностей измерения скорости разностей времени прихода (РВП) сигналов АЭ в статье [81] позволяет устранить из общей картины локализации группы сигналов с низкой точностью. Экспериментальные результаты подтверждают повышение надежности контроля.

В некоторых случаях для повышения точности локализации источников дополнительно предлагается использовать вейвлет-фильтрацию. Так, в изобретении

[82] предлагается расстояние от источника до приемника определять с помощью вейвлет-анализа сигналов АЭ, принятых от источников, находящихся на разных расстояниях. Вследствие дисперсии звуковой волны время распространения различных гармонических составляющих акустического сигнала от источника до приемника сигналов АЭ неодинаково, и по разнице времени прихода  $\Delta t$  этих гармонических составляющих можно судить о расстоянии от источника до приемника. Таким образом, для определения расстояния до источника сигналов АЭ достаточно определить задержки на различных масштабах разложения частотных вейвлет-коэффициентов, возникающие при распространении сигналов.

В работе [83] вейвлет-преобразование авторы применили для очистки сигналов от шумовой составляющей, что позволило свести шумы к минимуму и снизить порог фиксации сигналов АЭ. Это, в свою очередь, позволило с меньшей погрешностью определять время прихода сигналов АЭ на приемные преобразователи и таким образом повысить точность определения координат источников АЭ. Результаты экспериментов подтвердили работоспособность такой методики на реальных объектах диагностирования.

Зарубежные исследователи обращают внимание на проблему анизотропии акустических свойств. В работе [84] рассмотрена возможность локализации источников АЭ в материалах с анизотропными свойствами. Для повышения точности локализации использовали аффинное преобразование, частотную фильтрацию и вейвлет-преобразование. Несмотря на большой объем расчетов, получен удовлетворительный результат.

В статье [85] отмечается, что при контроле труб толщиной (2...6) мм сигнал АЭ передается волной Лэмба, поэтому при расчете координат источников приходится корректировать скорость распространения ультразвуковой волны с учетом этого факта.

Для крупных объектов проблема надежности локации решается использованием большого числа локационных антенн [86, 87]. Показано влияние избыточности данных на получение достоверной АЭ информации. Показана важность и

возможности оптимизации алгоритмов обработки АЭ информации при больших потоках данных.

Еще одной важной проблемой локализации источников является выделение сигналов на фоне шумов. Некоторые теоретические аспекты этой проблемы и моделирование сигналов АЭ на фоне шумов изложены в работе [88].

Другие исследователи в статье [89] утверждают, что амплитуда сигналов от структурных изменений меньше примерно на порядок по сравнению с сигналами от развивающейся трещины. Исследования были проведены на алюминиевых образцах.

В работе [90] разработана методика определения координат сигналов с низким соотношением сигнал/шум. Предложенная авторами методика предполагает непрерывную запись АЭ информации в заданном интервале времени наблюдения и его пок кадровое разбиение с целью обработки и сравнения информации каждого кадра. Дальнейшее Фурье- или вейвлет- преобразование каждого кадра позволяет у кадров, записанных разными каналами, отыскивать участки с высоким коэффициентом подобия и таким образом определять моменты времени прихода сигналов на канал.

В патенте [91] используются треугольные пьезоантенны на плоском объекте, которые наиболее точно позволяют вычислить координаты источников АЭ. Для вычислений используются формулы, описанные в полярных координатах.

В любом случае эффективность метода Монте-Карло при решении задачи определения координат источников АЭ, по мнению авторов статьи [92], несостоятелен относительно других способов локализации источников.

Таким образом, можно сделать вывод, что аналитический метод вычисления координат источников АЭ имеет наибольшую точность, однако для каждого конкретного объекта следует учитывать его акустические свойства, параметры АЭ и регистрируемых источников, анизотропию свойств и геометрические параметры ОК. Конечно, для литой детали сложной формы все эти факторы значимы и связаны с характером и местоположением источников.

#### 1.4. Методики идентификации источников акустической эмиссии

Идентификация источников АЭ является важнейшей составляющей этого метода контроля. Исследования по идентификации источников разделяются на две группы: первая посвящена разделению источников АЭ различной природы, а вторая – пространственному разделению источников.

Исследования, представленные в работе [93], показывают, что основными источниками АЭ при нагружении в макроупругой области вероятнее всего являются либо развитие несплошностей, либо протекание пластических деформаций в отдельных микрообъемах материала. В этом случае АЭ возникает из-за неоднородности материала, нагруженного неравномерно и, хотя в целом процесс соответствует упругой деформации, в отдельных его областях происходит пластическая деформация.

В работе [94] предполагается классификация источников в зависимости от масштаба деградации структуры материала. Масштаб разрушений структуры в эксперименте авторами определяется по энергии сигналов АЭ. При малоцикловом нагружении образцов из алюминиевого сплава Д20 по методике [95] установлено, что на ранней стадии испытаний в основном развиваются макроисточники. При дальнейших испытаниях макроисточники практически исчезают и развиваются источники мезо- и микроуровня, с преобладанием последних. Далее, перед разрушением формирование макродефектов приводит к регистрации источников только макроуровня и микроуровня.

Результаты исследований [96] показывают, что АЭ, характеризуемая активностью и суммарной энергией в неоднородных образцах из низкоуглеродистой стали с трещинами проявляются на самых ранних стадиях нагружения, в то время как отсутствие дефектов приводит к увеличению латентного периода на начальной стадии нагружения и более активному росту этих параметров при высоких нагрузках.

Представляют особый интерес сравнительные исследования результатов рентгенографического и АЭ методов, дополненные металлографическими исследованиями, приведенными в статье [97]. Полученные авторами данные говорят о том, что 35 % дефектов, выявленных рентгенографическим методом, не являются развивающимися и, следовательно, слабо сказываются на снижении ресурса труб. В то же время часть не обнаруженных этим методом дефектов являются развивающимися и успешно идентифицированы АЭ методом.

Важное наблюдение сделано в работе [98], в которой проанализированы результаты локализации источников АЭ в процессе эксплуатации сосуда, работающего под давлением. Активные источники АЭ проявляют себя даже в режиме нормального функционального режима работы оборудования и успешно локализуются АЭ аппаратурой. При этом исключается создание предельных нагрузок, болезненных для любого объекта, работающего под давлением.

Анализ природы формирования АЭ материала позволил авторам статьи [99] сделать вывод о том, что поле волн АЭ, образованное возникающим или изменяющимся размерами дефектом, характеризуется значительно большими амплитудами по сравнению с полем перемещающейся дислокации или их группы.

Исследования в работе [100] позволили выделить процессы развития трещин, мезопроцессы и процессы перемещения дислокаций по полученным энергии сигналов АЭ и их длительности. Также проанализированы статистические параметры приведенных групп сигналов.

Отдельным вопросом при идентификации трещин является возможность определения их размеров. В этом направлении в работе [101] рассмотрена проблема определения величины трещины в боковых рамах и надрессорных балках грузового вагона АЭ методом и проанализирован накопленный опыт эксплуатации систем для контроля литых деталей тележек. Расчеты, проведенные авторами, показывают, что чувствительность применяемой АЭ аппаратуры достаточна для оценки усталостных трещин как при их зарождении, так и при дальнейшем развитии.

В работе [102] с помощью метода АЭ зафиксировано зарождение полосы деформации по повышению энергии сигнала и смещению спектра АЭ в сторону низких частот.

Авторы статьи [103] исследовали образцы из сплава АмГб при деформировании с параллельной регистрацией структурных изменений оптической аппаратурой с высокой разрешающей способностью. Механизмом генерирования акустического сигнала, по предположению авторов, является лавинообразное распространение фронта размножения дислокаций в поликристаллическом сплаве.

В статье [104] авторы разработали методику разделения стадий деформирования материала. Используя отношение математического ожидания квадрата характеристики АЭ ко второму начальному моменту, авторы добиваются того, что при переходе от стадии упругой деформации к пластической или от развития микротрещин к формированию макротрещины значение этого параметра изменяется, что и является фактом завершения переходного процесса. Такую методику контроля состояния можно использовать при анализе временных параметров и счета сигналов АЭ. Аналогичный результат получен при анализе поведения инварианта, рассчитанного по амплитудным значениям сигналов АЭ в работе [105].

В работе [106] разработана оригинальная методика оценки глубины эллиптического дефекта на поверхности контролируемого трубопровода в зависимости от параметров АЭ, по которой, в свою очередь, судят о ресурсе изделия и учитывают при расчетах.

Авторы [107] исследовали АЭ, возникающую в шестернях с искусственными дефектами в виде засверловок различных размеров. При этом АЭ получали в ходе работы шестерен и обнаружили, что величина засверловки сказывается на амплитуде регистрируемых сигналов. При этом спектральная составляющая сигналов не изменялась.

В ряде работ, в частности в статье [108], построена феноменологическая модель и получены аналитические выражения, связывающие полную энергию АЭ с параметрами нагружения и размерами трещины. Экспериментально на образцах из стали 10ГН2МФА и 25ЧН3МФА установлено, что можно выделить три этапа

зависимости суммарной энергии АЭ от напряженного состояния. Первый соответствует локальной пластической деформации, второй – паузе перед развитием макротрещины и третий – стадии развития трещины. При этом суммарная энергия изменяется по зависимости, близкой к степенной.

В [109] доказываемся малоцикловый механизм развития трещин в боковых рамах нового изготовления при наличии концентраторов напряжений заданных размеров. Обосновывается эффективность использования стенов для выявления трещин на ранней стадии эксплуатации боковых рам в связи с большим количеством металлургических дефектов, не обнаруженных на заводах-изготовителях.

В связи с тем, что реальный размер трещин в процессе АЭ контроля непрерывно изменяется, автором статьи [110] введено понятие функции распределения трещин по длине и предложена модель распознавания функции распределения на основе динамики изменения амплитудно-частотного спектра сигналов АЭ, регистрируемых от трещин. В еще одной работе на эту тему [111] авторы попытались моделировать обратную задачу и получили удовлетворительный результат совпадения процесса моделирования и реальных экспериментальных данных.

В работах [112, 113] предлагается использовать метод нейронных сетей, т. е. принцип самообучающейся системы диагностирования, когда за каждым актом АЭ стоит определенный типоразмер источника. Исследования проводили по восемнадцати индивидуальным параметрам каждого сигнала с присвоением класса источника после обработки информации.

Важное значение при распознавании источников имеют реализуемые методики и аппаратные возможности обработки АЭ информации.

В изобретении [114] определяют огибающую переднего фронта акустических сигналов, задают пороговые величины выше уровня шумов, не выше максимального значения быстрой моды и ниже максимального значения медленной моды, локализируют эти сигналы, сравнивают полученные распределения суммарного счета сигналов вдоль сварного шва с теоретическим равномерным распределением суммарного счета, выделяют участки сварного шва с наибольшим отклонением экспериментального распределения суммарного счета сигналов АЭ от теоре-

тического. На этих участках производят кластеризацию сигналов по скорости нарастания переднего фронта между пороговыми уровнями и при превышении установленного критического числа сигналов, попавших в один кластер, судят о наличии дефекта.

В работе [115] рассмотрены вопросы идентификации источников на основе функции спектральной плотности, которая отражает статистику поведения дефектов конструкции гидротехнических сооружений, позволяет идентифицировать их по виду спектра и является основой для создания атласа АЭ образа дефектов. Однако данная методика годится только для объектов простой формы, где положение источника мало влияет на трансформирование и путь волнового пакета каждого отдельного сигнала АЭ.

Группа исследователей в статье [116] рассматривает возможность моделирования образа источника в зависимости от его вида, размеров и местоположения. Моделирование проводили методом конечных элементов и с помощью программного приложения COSMOS/M применительно к листовым объектам – основным элементам мостовых конструкций. Результаты исследований удовлетворительно сходятся с экспериментом, но требуют учета многих факторов даже для тавровых конструкций из листовых сталей, к тому же при расчетах заложена изотропность исследованного материала.

В еще одной работе – [117] – предлагается использовать математический аппарат нечеткой логики при анализе спектров сигналов, регистрируемых при разрушении композитов типа стеклоэпоксидная смола. Авторы анализировали соотношение составляющих спектральной плотности и обнаружили связь перераспределения этих составляющих от механизма разрушения. Проведенные исследования показывают, что использование такой методики идентификации позволяет определить механизм разрушения исследованных композитов.

В. В. Корчевский в работе [118] исследовал АЭ, возникающую в упругой области деформаций сталей при высокой чувствительности приемных каналов. В результате фиксировали дискретную и непрерывную АЭ. Основной задачей исследований была оценка остаточной деформации по увеличению потока непре-

рывной АЭ. Результаты исследований позволяют определять уровень остаточных деформаций по величине плотности потока энергии непрерывной АЭ.

Статья [119] посвящена исследованию активности АЭ при растяжении образцов из стали 06МБФ с надрезами V и U-образного типа. Полученные результаты показывают, что на стадии роста напряжений активность из устья концентратора напряжений меняется скачкообразным образом. Однако авторы выбрали слишком малый шаг частоты дискретизации активности. Тем не менее из экспериментальных данных видно, что активность в целом возрастает на стадии упругой деформации и затем несколько снижается на стадии пластического деформирования. При исчерпании ресурса пластической деформации активность существенно снижается и затем наблюдаются отдельные всплески сигналов при развитии макротрещины.

Авторы работы [120] показывают, что при использовании распределенной АЭ системы локация источников происходит по другому принципу обработки информации, и в некоторых случаях определение координат источников может быть точнее.

При идентификации источников одним из перспективных методов в ряде работ указывается кластерный анализ [121–123]. В работе [124] исследованы методы кластеризации источников по форме сигналов АЭ и по времени нарастания в стальных объектах. Результаты показывают, что метод кластеризации по скорости нарастания переднего фронта огибающей сигнала АЭ имеет большую погрешность и, как следствие, образует кластеры большего размера по сравнению с кластерами, определенными по форме сигналов АЭ. В то же время методика кластеризации по времени нарастания имеет более высокое быстродействие и предпочтительнее при обработке больших потоков информации при АЭ мониторинге.

В результате исследований развития трещин на фоне коррозии авторы работы [125] обнаружили закономерности изменения спектральных характеристик и амплитуды сигналов АЭ при развитии коррозионных трещин на фоне сигналов от медленных коррозионных процессов деградации структуры.

В общепринятых условиях периодического АЭ контроля при реализации типовой схемы нагружения возможные локальные коррозионные дефекты практически не проявляются до достижения уровня рабочего давления [126]. Однако этот факт не исключает вероятности разрушения объекта от коррозионных повреждений. Следовательно, АЭ диагностику коррозии эффективно и более целесообразно проводить не при периодических испытаниях, где возможны внезапные разрывы на коррозионных дефектах, а в режиме текущей эксплуатации вблизи рабочих давлений, т. е. в условиях мониторинга.

В патенте [127] предлагается судить о пригодности тележки железнодорожного вагона для перевоза крупногабаритных и взрывоопасных грузов по равномерному износу узлов тележки с «правой» и «левой» стороны. Неравномерность износа определяется различием параметров АЭ с «левой» и «правой» стороны, полученных при движении вагона по кольцевому участку в двух противоположных направлениях, когда «левая» и «правая» стороны находятся поочередно в одинаковых максимальных условиях нагружения.

При идентификации источников авторы работы [128] предлагают использовать фильтрацию сигналов, заключающуюся в первоначальном сравнении времени регистрации сигналов и их амплитуд. При сравнении учитывают скорость распространения волн, коэффициент затухания и реальные координаты приемников. Встроенные алгоритмы фильтрации позволяют исключить сигналы, не связанные между собой.

В работе [129] была исследована АЭ образцов различной конфигурации, в том числе со сварными швами. Накопленные результаты показывают, что каждый объект контроля в силу свойств материала, формы и размеров обладает собственным набором значимых параметров АЭ. Поэтому данные испытаний конкретного объекта можно использовать в дальнейшем при диагностике объектов похожей формы и условий изготовления.

Применение методики регистрации отдельных компонентов волновых пакетов [130] позволяет разделять моды продольных и поперечных волн в объемных объектах. Последующая обработка позволяет эффективно идентифицировать ис-

точники в виде участков пластической деформации и развивающиеся микротрещины. Такие результаты получаются на основе анализа изменения мощности, распределения плотности потока энергии, энергетических спектров сигналов АЭ. Однако последующая оценка величины дефектов проводится другими методами неразрушающего контроля.

В работе [131] авторы рассматривают статистические критерии оценки состояния сосудов, основанные на обработке параметров сигналов АЭ. В частности, в качестве значимых параметров проанализированы корреляционный критерий, критерий Фишера, ковариация параметров сигналов. Введенные статистические параметры оценки состояния источников АЭ позволяют разделять их по степени опасности.

Таким образом, разработано достаточно много методик определения источников АЭ различной природы, более того, при адекватной идентификации источников вполне можно определять и размеры развивающихся трещин в различных металлических объектах. Все эти наработки можно использовать для их реализации, в том числе в литых деталях.

### **1.5. Возможности оценки ресурса металлических изделий с использованием метода акустической эмиссии**

С обобщением опыта применения метода АЭ для поиска дефектных структур – потенциально опасных, имеющих наибольшую вероятность разрушения и определения состояния уже развитых дефектов (трещины, износы и т.д.) разрабатываются и используются методики определения ресурса деталей, узлов и конструкций с применением АЭ аппаратуры. Надо сказать о том, что пытаются при-

менить АЭ диагностику в качестве экспертного метода для определения ресурса металлических изделий уже более 30 лет [132, 133].

Как показано в работе [134], при определении ресурса сосудов давления стоит задача выявления дефектов различных типов: трещины, износ, питтинг, вздутия и расслоения и в том числе накопления повреждений при ползучести металла. Применение АЭ метода, как правило, ограничивается определением местоположения источника АЭ, а для его идентификации используются другие методы. Тем не менее новые научные разработки интенсивно развиваются в направлении расширения информативности АЭ диагностики. Для оценки технического состояния объектов привлекают специализированные системы АЭ диагностирования [135] или алгоритмы обработки [136], позволяющие выделять полезную информацию из волнового пакета зарегистрированных сигналов АЭ.

Методики оценки ресурса предусматривают использование как циклического нагружения [137–139], так и статического [140–141]. Тем не менее в большинстве случаев надежность метода возрастает, если его используют совместно с другими методами и средствами определения технического состояния изделий [142]. В этом случае опять же разделяют применение метода АЭ как первичного контроля, по результатам которого строят последующую систему диагностирования объекта, либо как подтверждающий контроль определения состояния другими методами, в том числе расчетными.

Для оценки состояния объекта диагностирования следует выбирать ряд критериев оценки. Для этого комплексно проводится корреляционный анализ параметров АЭ в зависимости от величин, характеризующих долговечность изделия или конструкции, и применяется метод экспертных оценок, значимость которого должна падать с дальнейшим развитием методологии ресурсных испытаний неразрушающими методами контроля.

Последнее десятилетие исследования, связанные с определением долговечности материалов АЭ методом, ведутся в трех основных направлениях:

- определение связей структурного состояния различных материалов с параметрами АЭ и их физическое обоснование;

- анализ АЭ, излучаемой развивающимися усталостными дефектами (в первую очередь трещинами);
- модели практического применения метода АЭ для определения ресурса реальных объектов.

При исследованиях АЭ, генерируемой структурными изменениями материала, интересный подход зависимости скорости работы источника дислокаций и частоты столкновений движущихся дислокаций, скорости их отрыва и наличия неподвижных барьеров (участков накопления и развития макродефектов) от характеристик неискаженных сигналов АЭ приводится в работе [144]. При этом метод имеет ряд существенных ограничений, связанных с решением задачи восстановления первичного (в момент генерирования) сигнала АЭ. Если решение такой задачи для изотропных объектов простой формы принципиально возможно, то существенные искажения акустического тракта в объекте сложной формы учесть нельзя, и это существенно усложняет задачу.

В разработке [145] для определения ресурса используется анализ спектральной плотности АЭ, записанной в ходе механических испытаний. Далее сравнивают полученные спектральные пики с эталонными пиками, полученными при механических испытаниях эталонных объектов с различными физико-механическими свойствами (размеры зерен и субзерен структуры, предел текучести, относительное удлинение и сужение и др.). Весь анализируемый спектр разбит на пять поддиапазонов в пределах 4,2...62 744 Гц, в которых оценивается АЭ различного происхождения: ультразвуковых колебаний субзерна (19,1...62,7 кГц), колебания сдвига-отрыва (1,9...2,7 кГц), модулирующие релаксационные колебания двойникования (82...434 Гц), релаксационные колебания структурного упрочнения (17,85...50,2 Гц) и релаксационные колебания инфрачастоты (4,2...4,6 Гц). Таким образом, оценка состояния материала определяется только по характеру структурных изменений в материале. Метод имеет одно существенное усложнение (которое, во многих случаях, является ограничением) – требуется предварительное исследование структурного состояния материала и уточнения корреляционной зависимости спектральной плотности сигналов АЭ с характери-

стиками зеренной структуры. Этот способ имеет те же недостатки, что и выше-рассмотренный. Кроме того, вызывает интерес способ регистрации источников, так как в работе [145] предложено записывать часть АЭ, излучаемую при структурных изменениях на сверхнизких частотах, в то время как общеизвестно, что структурные изменения микроуровня генерируют АЭ на значительно более высоких частотах [5].

Другой подход связан с определением запаса прочности как отношения предельной нагрузки (при которой происходит разрушение) к рабочей нагрузке [146]. При этом основным регистрируемым параметром является скорость счета АЭ. Такой способ имеет ряд достоинств: широкий диапазон диагностируемых материалов, низкая трудоемкость, но, как покажет дальнейший обзор, он возможен только для стационарно растущих дефектов типа микротрещин. На практике это часто осуществить затруднительно в силу дисперсии прочностных свойств материала объектов сложной формы. Кроме того, не решается задача определения длительной прочности при циклических нагрузках.

В изобретении [147] утверждается, что наличие АЭ требует применения измерений деформаций для оценки ресурса, а при ее отсутствии изделие должно признаваться годным.

Автор работы [148] приводит в качестве критерия оценки структурного состояния, прогнозирования прочностных свойств и долговечности квазихрупкого материала параметр, связанный с отношением энергии АЭ за определенный промежуток времени механических испытаний к суммарной энергии диссипации за этот же период. Этот критерий слабо зависит от временного интервала испытаний, но жестко связан с относительным напряжением разрушения. Несмотря на то, что исследования касались керамических материалов, несомненно, что для металлов хотя бы частично действуют те же механизмы генерации АЭ при механическом статическом нагружении. Основными трудностями в данном подходе являются точное определение энергии диссипации и то, что нагружение следует проводить в неупругой области. Это всегда существенно сказывается на надежности ОК при последующем использовании.

Авторы статей [149, 150] отмечают тот факт, что как деформация, так и счет АЭ обладают стадийностью, и в связи с этим появляется возможность определения стадии деформированного состояния в зависимости от потоковых характеристик АЭ. Эти факты отмечались и в других работах, например [151], но следует помнить, что они всегда привязаны к конкретному структурному состоянию. Основные проблемы при использовании такого метода возникают при обобщениях даже для материала с одним химическим составом, что, очевидно, связано с индивидуальными особенностями дефектных структур, прогрессирующих в материале объектов исследования.

Если же и возможно определить текущее структурное состояние, то, как правило, это конкретное состояние материала на стадии предразрушения или на границе характерных необратимых изменений [152].

В. В. Носов и И. Н. Бураков в статье [153] исследовали параметры возникающей АЭ на стадиях локальных динамических изменений, проходящих на стадиях, не соответствующих скачкам трещины. Авторами отмечено, что на крупных структурных элементах происходят более масштабные высвобождения энергии в виде АЭ. На стадии делокализованных изменений это позволяет по амплитуде сигналов судить о величине необратимых процессов в материале образца и изделия.

Важные выводы поведения параметров АЭ на стадии деформирования материала сделали С. И. Буйло и А. С. Трипалин еще в середине 80-х гг. прошлого столетия [154, 155]:

- изменения скорости деформаций практически не влияют на вид амплитудного распределения АЭ и в основном сводятся к изменению среднего значения амплитуд АЭ;
- зависимость среднего значения регистрируемой амплитуды АЭ от скорости деформации имеет сложный вид и связана с преодолением препятствий при разрушении на высоких скоростях деформации, а при малых скоростях деформации зависимость средней амплитуды от скорости приближается к линейной.

Эти исследования подтверждают теорию зависимости амплитуды (и энергии) акта и сигнала АЭ от площади образовавшихся двух свободных поверхностей и скорости этого процесса, причем влияние скорости сказывается только при очень высоких значениях, достижимых только в специально созданных условиях, в практике же АЭ контроля этим влиянием можно пренебречь.

Отдельный интерес представляет класс исследований при статической нагрузке объектов, так как при диагностике реальных деталей и конструкций наиболее удобным видом нагрузки является именно этот, ввиду более простой конструкции нагружающего устройства, времени проведения контроля, затрачиваемых информационных ресурсов АЭ аппаратуры и ряда других показателей.

Таким образом, подытоживая исследования в области определения структурно-напряженного состояния металлов методом АЭ, можно сделать следующие выводы:

- метод не позволяет определить текущее структурное и напряженное состояние материала при статическом нагружении в любой момент времени испытаний;
- метод может определять характерные структурные состояния (например, переход от упругого деформирования к пластическому, состояние предразрушения), соответствующие точкам бифуркации в процессе эволюции напряженного состояния;
- при испытаниях в областях напряжений, соответствующих рабочим, т. е. существенно ниже напряжения упругопластического перехода, наиболее полную картину структурно-напряженного состояния дает циклическое нагружение, и чем больше число циклов, тем более объективные результаты получаются;
- в условиях производства уровень характеристик потока будет существенно зависеть от уровня шумов, не связанных с АЭ материала, и, как следствие, искажать результаты диагностики.

В результате обзора работ этого направления можно сделать вывод о том, что уровень техники и знаний исследователей не позволяют в настоящее время

самостоятельное использование АЭ метода для диагностики структурно-напряженного состояния материала. Однако как способ дополнительного или совместного определения АЭ метод может быть применим в отдельных случаях, когда были проведены обширные исследования эволюции состояния материала и мероприятия по максимальному устранению шумовых сигналов методически или аналитически.

Кроме того, следует отметить, что экспериментальное исследование АЭ возникающих и растущих трещин проводится при статическом или циклическом нагружении объектов диагностики. При этом каждый из видов нагружения, а также его параметры, оказывают существенное влияние на получаемые результаты и зафиксированные параметры АЭ.

Вместе с тем в работе [156] отмечается, что АЭ растущих трещин является нестационарным дискретным процессом и на параметры регистрируемых сигналов АЭ сильное влияние оказывают геометрическая форма исследуемых объектов, вид и характеристики нагружения. Кроме того, теми же авторами – [157], отмечается факт того, что самостоятельное использование метода АЭ для анализа изменений структурного состояния материала объектов диагностики имеет высокие погрешности для большинства параметров АЭ.

При решении задачи диагностирования состояния металлических объектов во многих работах, в частности [158, 159], однозначно установлено, что интервал времени, предшествующий разрушению, сопровождается резким повышением уровня потоковых характеристик АЭ трещины или другого дефектного участка, в котором в последующем происходит разрушение.

В. А. Робсман показал, что в области неупругой деформации трещины плотность вероятности распределения энергии сигналов АЭ хорошо аппроксимируется с аналогичным законом распределения размеров дефектов [160]. На разных стадиях неупругой деформации этот закон последовательно эволюционирует из экспоненциального в Вейбулловский, а на стадии предразрушения – в закон Гаусса. Исследования на объектах авиационной техники показали, что по параметрам

сигналов АЭ хорошо определяется КИН в вершине растущей трещины, а значит, можно сделать вывод и о состоянии ее кромок [161].

В работе [162] приводится обзор моделей оценки степени опасности источников АЭ, к которым относят методы, сведенные в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Методики оценки состояния объекта с применением АЭ диагностики [162]

Метод	Основная сущность метода	Достоинства и недостатки
Эмпирический	Эмпирические связи параметров АЭ с характеристиками состояния объекта диагностики	Д: простота интерпретации результатов. Н: низкая точность, недостаточная информативность метода
Нейронных сетей	Распознавание образов источников АЭ с применением системного анализа по большому количеству параметров	Д: определение <b>типов</b> дефектов с высокой степенью вероятности. Н: значительные технические, временные и информационные ресурсы, привлекаемые для решения задачи
Нечеткой логики	Сопоставление значений входных параметров АЭ с логическими терминами и оценка состояния объекта по определенным логическим правилам	Метод занимает промежуточное место между эмпирическим и методом нейронных сетей

Кроме того, для обнаружения зарождающихся дефектов на ранних стадиях их развития целесообразно оценивать распределение регистрируемых сигналов АЭ в ходе нагружения, которые при появлении дефекта в локальной области начинают отклоняться от Пуассоновского. Степень этого отклонения по различным параметрам АЭ свидетельствует о появлении относительно опасного дефекта

[163]. Такой метод имеет неоспоримое достоинство: критерии оценки не зависят от предыстории нагружения, а значит, его можно использовать при периодической диагностике.

В целом при разработке методики АЭ диагностики технического состояния объектов и прогнозирования их ресурса следует учитывать еще несколько факторов:

- в зависимости от используемых параметров и условий контроля метод АЭ может быть чувствителен к истории предварительного нагружения или нечувствителен к ней [164];
- следует максимально исключить возможность искажения параметров сигналов АЭ, чтобы использовать информативный класс характеристик амплитудно-частотного распределения;
- определение остаточного ресурса объекта всегда носит вероятностный характер, а вероятность зависит от количества и качества полученной в ходе диагностики информации [165].

Авторы работы [166] отмечают, что при контроле резервуаров можно выделять не только участки с развивающимися трещинами, но и участки с коррозионными повреждениями, и оценивать размеры этих дефектов. Это позволяет учитывать выявленные дефекты при использовании традиционных расчетов остаточного ресурса изделий.

Авторы статьи [167] подробно описывают место и задачи АЭ контроля при диагностировании ресурса различных технических изделий, а также основные трудности в использовании метода и принятии решений на основе полученных данных. Учитывая тенденции к усложнению систем и их возможностей, сделан вывод о повышении информативности и сложности обработки информации в дальнейшем. В работе [168] предлагается ввести некий обобщенный параметр АЭ, который можно использовать совместно с другими исследованными параметрами материала изделия и прогнозировать дальнейшее состояние исследуемого объекта.

Последние исследования по применению АЭ метода для оценки ресурса металлических объектов носят методический характер. В работе [169] рассматривается принцип выделения типов источников АЭ на основе принципа нейронных самообучающихся сетей. Такой подход, однако, пригоден для объектов с предсказуемой формой и акустическими свойствами.

По мнению И. М. Романишина, АЭ метод позволяет дать интегральную оценку деградационных процессов, протекающих в объекте, и не позволяет оценить дефектный участок по сечению [170]. В то же время автор статьи согласен с тем, что АЭ контроль может определить динамику деградационного процесса.

В работе [171] проведены исследования по применению АЭ метода в режиме эксплуатации на участках технологических трубопроводов. Авторы показывают, что и в эксплуатационном режиме на элементах трубопроводов можно эффективно выявлять различные дефекты, развивающиеся под рабочими нагрузками.

В еще одной работе [172] проведены теоретические и экспериментальные исследования нагружения стальных образцов со сварными соединениями и зависимость суммарного счета АЭ и активности от размеров образцов. Авторы отмечают зависимость параметров АЭ от параметров распределения Вейбулла. Теоретические данные имеют хорошее совпадение на начальной стадии деформирования, в том числе в упругой области, что важно для оценки ресурса изделий из исследованного материала.

В статье [173] рассмотрены аналитические модели определения ресурса различных технических объектов на основе данных о нагруженном состоянии объекта, что в современных условиях эксплуатации деталей подвижного состава определить, фактически, невозможно.

Таким образом, проведение ресурсных испытаний связано с задачами выявления потенциально опасных участков, на которых высока вероятность появления локальных необратимых изменений за период до следующей диагностики или уже явных дефектов с последующей оценкой их величины методом АЭ или другим методом НК.

Вместе с тем ряд исследований показывают, что совместное комплексное использование АЭ метода диагностики и других методов контроля позволяет достичь более надежных результатов определения ресурса изделия [174]. В работе [175] показана необходимость предварительной информации об объекте диагностики.

А. А. Комаровский полагает, что достаточную для определения остаточного ресурса информацию, кроме знания о нагруженном состоянии объекта диагностики и его прочностных свойствах, несут потоковые характеристики АЭ [176].

### **Выводы по первой главе**

АЭ метод контроля является важным компонентом системы НК различных объектов. Проводимые исследования доказывают, что метод может решать разные диагностические задачи для различных металлических объектов.

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, не выработана обобщенная модель разработки и определения основных параметров АЭ контроля. Во-первых, такая модель требуется для выбора основных параметров контроля АЭ метода в самом общем случае, т. е. когда материал имеет неоднородные акустические свойства, большое число разнообразных внутренних допустимых дефектов, местоположение которых чаще имеет случайное распределение, сложную геометрическую форму и переменную толщину. Во-вторых, построение алгоритма АЭ контроля и выбор значимых параметров зависит от задач контроля и требует обоснования выбора этих параметров в том или ином случае.

В контексте обозначенной задачи одними из самых удачных объектов АЭ диагностирования являются литые детали тележек грузовых вагонов – боковые рамы и надрессорные балки, обладающие всеми перечисленными свойствами, затрудняющими выбор основных параметров настройки диагностических систем, критерии оценки состояния объекта. Кроме того, выбранные детали в процессе своего жизненного цикла, исходя из производственных [177], эксплуатационных [178, 179] и ремонтных [180, 181] требований и факторов, необходимо контролировать с разными целями:

- определение потенциальной опасности различных литейных дефектов;
- оценка качества ремонта сваркой и наплавкой отдельных участков боковых рам и надрессорных балок;
- оценка параметров ресурса деталей при продлении их срока службы;
- оценка потенциальной опасности уровня износа отдельных участков деталей и др.

Поэтому литые детали тележки грузовых вагонов являются особыми объектами, обладающими большим количеством свойств, затрудняющих как процесс контроля, так и обработку и интерпретацию результатов контроля. Проведение экспериментальных и теоретических исследований таких объектов является важным этапом на пути развития метода АЭ в самом обобщенном контексте его применения к техническим объектам с подведением определенных дедуктивных и индуктивных выводов в данном направлении. Кроме того, такой подход важен для практического применения АЭ метода к диагностике объектов с низкой контролепригодностью для методов контроля, и результаты исследований могут иметь несомненную внедренческую значимость.

Современные исследования в области АЭ диагностики показывают, что в настоящее время основную актуальность применительно к любому объекту имеют следующие задачи:

- поиск производных как потоковых, так и индивидуальных параметров сигналов АЭ, наиболее достоверно характеризующих состояние отдельных участков с точки зрения анализа результатов оператором;

- точность локализации источников в контексте наличия различных мешающих факторов: наложения сигналов, относительно высокий уровень шумов, достоверность определения акустических характеристик материала и геометрических параметров объектов диагностики;
- построение моделей и алгоритмов определения остаточного ресурса, достоверно прогнозирующих работоспособность контролируемых объектов.

Проведение опытов по получению АЭ данных при разрушении образцов из малоуглеродистой литой стали и на реальных объектах, а также анализ данных и построение эмпирических работоспособных моделей оценки состояния литых деталей, подкрепленные современными теоретическими представлениями из области механики деформирования и материаловедения, являются приоритетными задачами последующих разделов данной работы. Важное значение имеют полученные в результате проведенного анализа обобщения, пригодные к применению для АЭ контроля любых стальных объектов при решении разных диагностических задач.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ И ФАКТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ ИХ НАДЕЖНОСТЬ**

Литые детали подвижного состава характеризуются рядом факторов, существенно усложняющих их диагностику: сложную форму, существенную структурную неоднородность, наличие участков, допускающих ремонт с применением сварки и наплавки и как следствие сложное напряженное состояние. Поэтому на первом этапе необходимо определить возможность и актуальность АЭ метода для контроля литых деталей на разных этапах их жизненного цикла: при изготовлении, при периодическом контроле, после ремонта, после выработки назначенного срока эксплуатации. Эти обстоятельства диктуют предварительное тщательное исследование изменений их дефектного состояния и отказов. Актуальность применения АЭ метода заключается в его возможности оценить – будет ли развиваться усталостная трещина из области дефекта в ходе эксплуатации или нет.

Однако применение метода сопряжено с обеспечением нагрузки на ОК. И наиболее адекватное нагружение любой литой детали сложной формы позволит получить максимально достоверный результат.

Наиболее близкими объектами, позволяющими раскрыть тематику исследования, являются боковые рамы и надрессорные балки тележек грузовых вагонов, которые обладают большинством факторов, осложняющим контроль. Поэтому в данной главе будет проведен анализ факторов, определяющих развитие дефектов в литых деталях, и связь характеристик этих дефектов с изменениями напряжений и условий эксплуатации литых деталей подвижного состава.

Данный этап необходим для оценки опасности различных типов производственных и эксплуатационных дефектов и оптимального режима нагружения. Его выполнение позволит определить направление исследований по совершенствованию системы диагностирования литых деталей сложной формы.

## 2.1. Исследование напряжений в литых деталях, возникающих в процессе эксплуатации

Напряжения, как внутренние, так и возникшие в процессе приложения нагрузки, и их концентрация играют ключевую роль в развитии эксплуатационных дефектов и разрушении литых деталей. Прежде всего, определим параметры прочности материала боковых рам и надрессорных балок. Согласно нормативной литературе [182, 183] выделяются следующие основные параметры прочности литых деталей – таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики прочности сплавов для литых деталей тележки грузового вагона

Сталь	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа
20ГФЛ, 20ГЛ	294	490	170
20ГТЛ	343	510	180

Предел выносливости материала литых деталей относительно невелик и составляет всего 0,35 от предела прочности и соответственно 0,52...0,58 от предела текучести материала. Между тем, по данным работы [184], эксплуатационные нагрузки в боковых рамах могут существенно превышать стендовые, имитирующие рабочие режимы, и поэтому данный вопрос требует дополнительных исследований и анализа напряженного состояния деталей во время эксплуатации и при испытаниях.

В связи с этим были проведены теоретические и экспериментальные исследования напряжений, возникающих в процессе эксплуатации, которые позволяют определить наиболее напряженные участки деталей, оценить поведение этих участков в различных эксплуатационных условиях и выбрать режимы нагружения литых деталей, которые внесут минимальные необратимые изменения в деталь и

в то же время позволят эффективно выявлять локальные дефекты, находящиеся на разных стадиях своего развития.

Сначала нами были проведены теоретические исследования методом конечных элементов с использованием программного продукта Cosmos2013 различных моделей воздействия на детали тележки, а затем выборочно были выполнены экспериментальные измерения деформаций с последующим определением напряжений многоканальной тензометрической системы типа ММТС–64.01 [185, 186].

Очевидно, что деталь в ходе эксплуатации получает различные типы и величины нагрузок, и на нее постоянно воздействует комплекс сил. Основной нагрузкой, действующей на тележку грузового вагона, является динамическая вертикальная нагрузка. Для груженого вагона стандартная нагрузка на тележку, при предельно допустимой осевой нагрузке 230,5 кН и коэффициенте для динамической нагрузки 1,6 [187], составляет 737,7 кН. Циклическая частота такой нагрузки зависит от скорости движения поезда и состояния пути, и определить ее в каждом конкретном случае сложно. Дополнительным фактором, усложняющим расчет, являются возможные дефекты поверхности катания колеса и рельса. Как показали исследования воздействия ударных нагрузок на рельс [188, 189], сила ударного воздействия при наличии ползуна на поверхности катания колеса глубиной в 1 мм (предельно допустимое значение) может составлять до 1,5 от вертикальной динамической нагрузки. К тому же наличие ползуна или выкрашивания на поверхности катания колеса приводит к регулярной повторяемости такой ударной нагрузки. При диаметре колеса 860...950 мм средняя частота таких ударов составляет 350 ударов на км. Кроме того, такая нагрузка может носить скручивающий тележку характер, так как неровность в момент удара вероятнее всего будет только на одном колесе.

Другим распространенным видом нагрузки является боковая нагрузка, возникающая даже у полностью сбалансированных тележек на кривых участках. Рассмотрим также один из предельных случаев (однако часто встречающийся в холмистой и горной местности в Сибири и на Дальнем Востоке), когда кривая пути в

повороте имеет радиус 600 м. Непогашенное нормальное ускорение в кривой определяется по формуле:

$$a_n = \frac{V_{\max}^2}{13 \cdot R} - 0,006 \cdot h,$$

где  $R$  – радиус кривой, м;  $h$  – возвышение внешнего рельса над внутренним, мм;  $V$  – скорость движения, км/ч.

В этом случае ускорение при возможной скорости движения до 70 км/ч в кривой радиусом 300 м составляет до 0,8 м/с<sup>2</sup>. Для груженого вагона боковая сила составляет до 75 кН, однако такая нагрузка может быть разовой, чаще всего скорость на участках с большим количеством кривых меньше и боковая сила составляет до 50 кН. Для расчета напряжений, тем не менее, будем использовать максимальное значение 75 кН.

Еще одним видом дополнительной нагрузки при движении является продольная нагрузка, возникающая при разгоне и торможении или на наклонных участках. При экстренном торможении для полной остановки требуется около 120 с при скорости 72 км/ч (20 м/с), тогда при отрицательном ускорении около 0,17 м/с<sup>2</sup> и массе вагона 92 т получаем продольную силу 153,4 кН.

Кроме того, моделирование методом конечных элементов следует произвести для комплекса этих нагрузок, так как их совместное воздействие также возможно в реальной эксплуатации.

Сначала для качественной и приближенной оценки величины механических напряжений использовали расчет напряжений по Мизесу на конечно-элементной модели. За основу моделей для расчета были взяты элементы боковой рамы по чертежу 100.00.020-4сб и надрессорной балки по чертежу 100.00.010-4сб.

Исходя из данных чертежей боковых рам и надрессорных балок тележки модели 18-100, используемых при грузовых железнодорожных перевозках в подавляющем большинстве случаев, произвели расчет напряжений от вертикальной динамической нагрузки. При моделировании использовали средние значения геометрических размеров, без учета внутренних литейных усадочных раковин и другого типа литейных дефектов, ослабляющих сечения деталей. Нагрузка передавалась через силы, действующие в местах контакта детали с сопрягаемыми элемен-

тами тележки. Результаты расчетов напряжений при вертикальной динамической нагрузке в надрессорной балке приведены на рисунке 2.1, а в боковой раме – на рисунке 2.2.

Проведенные расчетные данные моделирования динамической вертикальной нагрузки показывают, что максимум нагрузки в надрессорной балке сосредоточен на боковых поверхностях технологических окон верхнего пояса и составляет до 216 МПа.

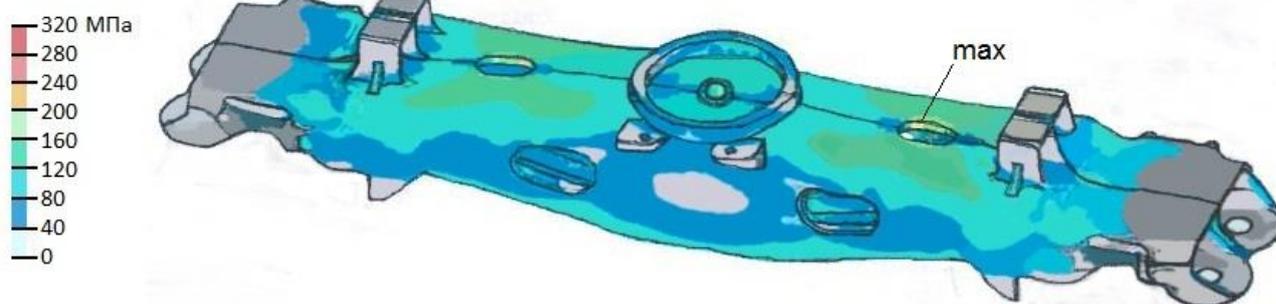


Рисунок 2.1 – Распределение растягивающих и сжимающих напряжений (по модулю) в надрессорной балке при вертикальной динамической нагрузке 737 кН

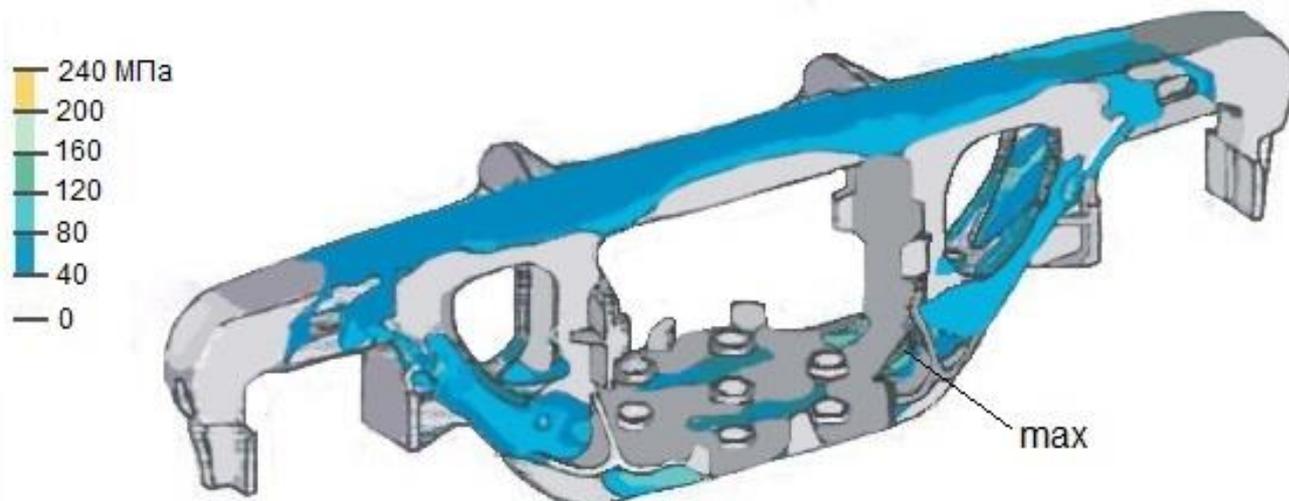


Рисунок 2.2 – Распределение растягивающих и сжимающих напряжений (по модулю) в боковой раме при вертикальной динамической нагрузке 737 кН

Следует отметить, что предел выносливости для сталей литых деталей составляет 190 МПа [182] и даже при динамической вертикальной нагрузке движущегося вагона он превышен. Это значит, что есть ненулевая вероятность при таких нагрузках развития усталостных трещин на технологических отверстиях верхнего пояса. Аналогичный расчет для такой же нагрузки на боковую раму приводит к максимуму напряжений в нижнем углу рессорного проема, на ребре жесткости и составляет 191 МПа, что также превышает предел выносливости материала.

Моделирование последующих видов нагрузки отдельно не выявило превышений пределов выносливости ни в одной области надрессорной балки и боковой рамы. Участки возникновения максимумов напряжений и значения этих напряжений в надрессорной балке приведены в таблице 2.2, а для боковой рамы – в таблице 2.3 [191].

Как видно из таблицы 2.2, в надрессорной балке при моделировании всех прочих одиночных и комплексных нагрузок напряжение даже в точке максимума не превышает предел выносливости детали за исключением случая продольной нагрузки при движении на подъем, когда смоделированная нагрузка достигает значения 264,7 МПа. Однако вероятность появления такой нагрузки, как уже было отмечено, мала, более того, при использовании вагонов на равнинных маршрутах, она вообще может не возникнуть.

При моделировании нагрузок на боковую раму совместная нагрузка на деталь приводит к напряжениям, превышающим предел выносливости в рессорном проеме, но максимальные напряжения определены в буксовом проеме при комплексе нагрузок, включая ударные, и они достигают значения 292,6 МПа, что существенно больше предела выносливости и сравнимо с пределом текучести материала. Если учитывать, что в реальных деталях толщины материала могут отклоняться до 5 мм, а также то, что литейные дефекты присутствуют практически во всех деталях, то напряжения могут достигать критических отметок.

Таблица 2.2 – Данные расчетов напряжений в надрессорной балке тележки модели 18-100 под воздействием различных видов нагрузок

Вид нагрузки	Величина нагрузки, кН	Место возникновения максимальных напряжений $\sigma_p$	$\sigma_p$ , МПа
Вертикальная динамическая (движение груженого вагона со скоростью 110 км/ч)	737	Края технологических отверстий верхнего пояса	216,2
Боковая (при движении в кривой радиусом 300 м)	75	Края технологических отверстий верхнего пояса	78,6
Торможение (продольная нагрузка)	156,6	Края технологических отверстий верхнего пояса	154,8
Одновременная нагрузка вертикальной динамической, боковой и продольной при торможении силами	757	Края технологических отверстий верхнего пояса	174,1
Вертикальная динамическая и удар от ползуна глубиной 0,5 мм	921	Опорная поверхность подпятника	171,1
Совместная нагрузка вертикальной динамической, боковой и продольной и удара от ползуна глубиной 0,5 мм	937	Опорная поверхность подпятника	186,3

В целом расчет распределения смоделированных напряжений при комплексной нагрузке показывает повышение напряжений на большинстве участков боковой рамы, а особенно в углах рессорного и буксового проемов. Напряжения в окрестности самого напряженного участка – во внутреннем углу буксового проема боковой рамы – представлены на рисунке 2.3.

Таблица 2.3 – Данные расчетов напряжений в боковой раме тележки модели 18-100 под воздействием различных видов нагрузок

Вид нагрузки	Величина нагрузки, кН	Место возникновения максимальных напряжений $\sigma_p$	$\sigma_p$ , МПа
Вертикальная динамическая (движение груженого вагона со скоростью 110 км/ч)	737	Ребро усиления в нижнем углу рессорного проема	191,0
Боковая (при движении в кривой)	75	Нижний угол рессорного проема	60,7
Торможение (продольная нагрузка)	93	Ребро усиления в нижнем углу рессорного проема	187,0
Одновременная нагрузка всех предыдущих	$\Sigma$	Ребро усиления в нижнем углу рессорного проема	237,4
Одновременная нагрузка всех предыдущих	$\Sigma$	Внутренний угол буксового проема	172,9
Вертикальная динамическая + удар от ползуна глубиной 0,5 мм	931	Ребро усиления в нижнем углу рессорного проема	243,0
Совместная нагрузка четырех сил, включая удар от ползуна	$\Sigma$	Ребро усиления в нижнем углу рессорного проема	252,2
Совместная нагрузка четырех сил, включая удар от ползуна глубиной 0,5 мм	$\Sigma$	Внутренний угол буксового проема	292,6

Полученные расчеты показывают, что при возникновении экстремальных рабочих состояний растягивающие напряжения во внутреннем углу буксового проема и нижнем углу рессорного проема существенно выше предела выносливости металла. Поэтому чем чаще будут появляться такие ситуации в процессе экс-

плуатации, тем вероятнее развитие усталостных дефектов и разрушение детали в этих зонах.

Однако точность результатов моделирования целесообразно проверить экспериментально, что и было сделано в работе [191]. Для проверки достоверности принятой модели и проведенных расчетов были проведены измерения деформаций на литых деталях. Были смоделированы два вида нагрузки: вертикальная динамическая и совместная нагрузка вертикальной динамической с ударной, возникающей под воздействием падения колеса на его неровности в виде ползуна или выщербины.

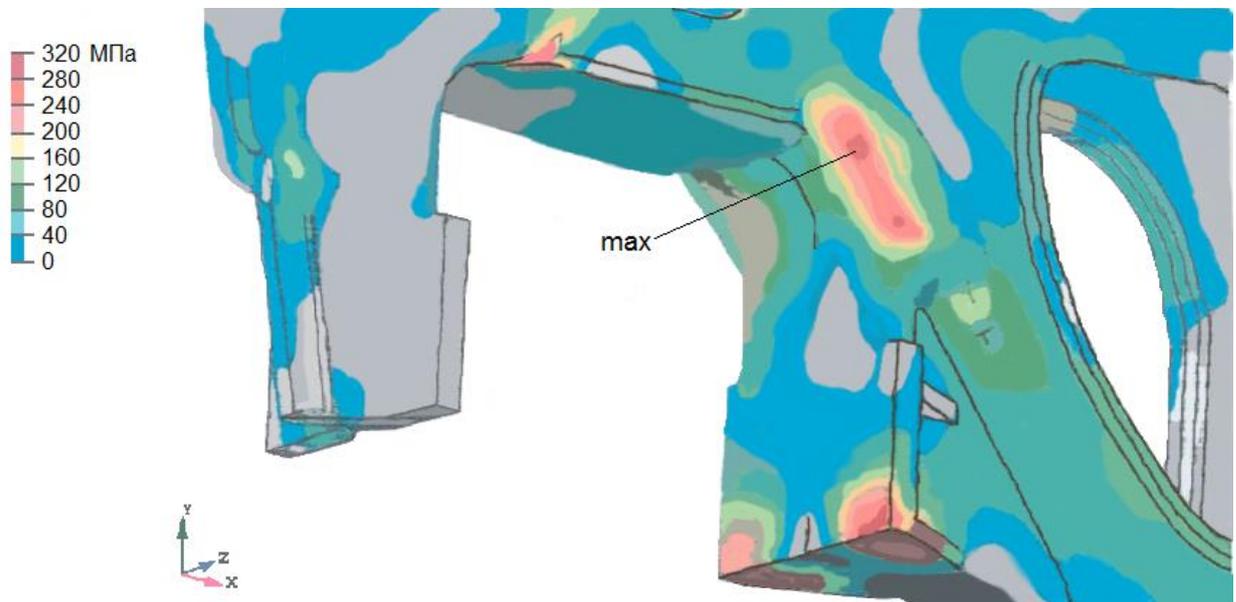
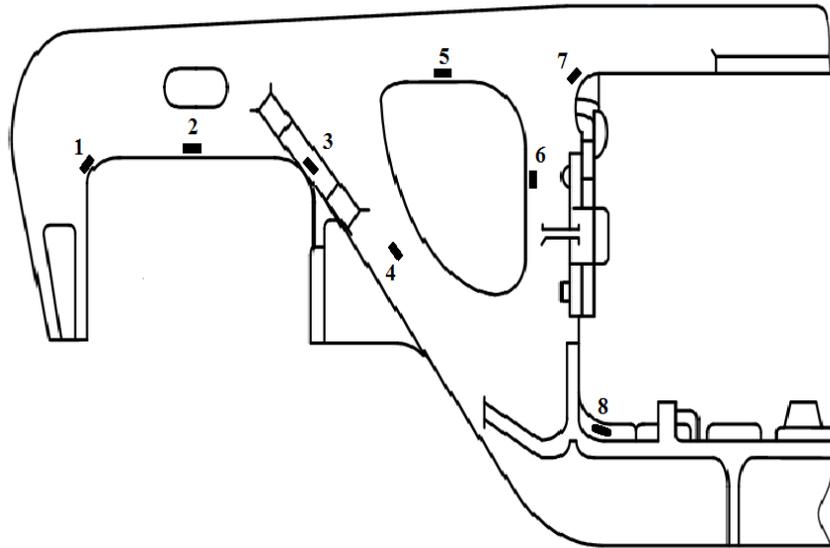


Рисунок 2.3 – Распределение напряжений в боковой раме при совместной нагрузке сил, действующих на деталь, включая удар на ползуне глубиной 0,5 мм

Тензометрические измерения боковой рамы и надрессорной балки осуществляли с помощью восьми тензодатчиков, наклеенных на участках с наиболее часто встречающимися дефектами и в зонах максимальных напряжений. Точки наклейки тензодатчиков приведены на рисунке 2.4. Однако во внешнем углу буксового проема боковой рамы при вертикальной динамической и ударной нагрузке напряжения отсутствуют, поэтому для точки *1* измерения проводили при растяжении буксовых проемов продольной нагрузкой величиной 93 кН.

a)



б)

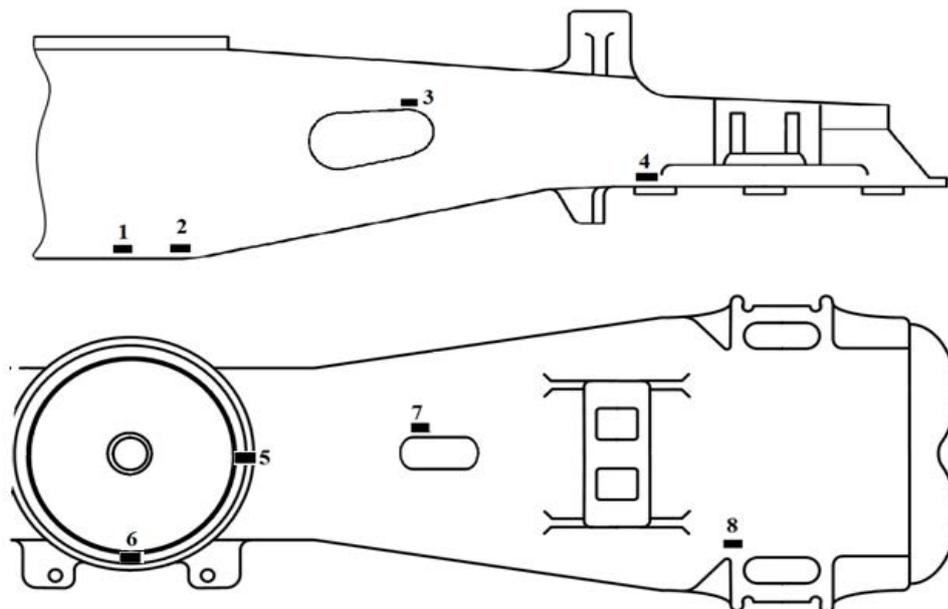


Рисунок 2.4 – Места установки тензодатчиков для экспериментального измерения напряжения в боковых рамах (а) и надрессорных балках (б)

Следует отметить, что моделирование наличия литейных раковин приводит к естественному повышению напряжений не только в месте нахождения такого дефекта, но и во всей детали [192]. Однако согласно техническим требованиям [177] в сечениях литых деталей, если эти раковины не выходят на поверхность и если их площадь не более 30% площади круга, вписанного в поперечное сечение

данного узла, то они являются допустимыми, а детали – пригодными к эксплуатации в рабочем режиме.

Сравнительные результаты расчетов и экспериментальных измерений напряжений при двух типах нагрузки в точках, указанных на рисунке 2.4, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнительные данные напряжений в литых деталях тележки модели 18-100, полученных при моделировании и измеренных экспериментально

№ точки	Напряжения в боковых рамах, МПа		Напряжения в надрессорных балках, МПа	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Вертикальная динамическая нагрузка				
1	<20,0	9,7	90,0	67,9
2	38,0	35,5	102,0	93,6
3	88,0	96,2	85,0	–
4	104,0	110,8	81,0	105,3
5	<20,0	5,3	81,0	27,2
6	25,0	24,0	82,0	59,7
7	45,0	58,1	216,0	193,1
8	191,0	83,6	124,0	156,8
Вертикальная динамическая и ударная от ползуна глубиной 0,5 мм нагрузка				
1	–	-	103,0	81,4
2	124,0	54,7	114,0	112,3
3	164,0	150,0	101,0	–
4	122,0	171,9	85,0	120,1
5	<20,0	15,2	105,0	32,6
6	44,0	37,5	96,0	71,6
7	91,0	90,6	232,0	231,7
8	178,0	129,7	161,0	188,1

Наличие предельно допустимых дефектов при моделировании повышает напряженное состояние в месте их нахождения при наличии изгибной нагрузки (например, в углах буксовых проемов боковых рам или нижнем поясе адрессорных балок) на 10...15 %.

Кроме того, в расчетах не учитывалось возможное ослабление на участках ликваций, отремонтированных сваркой и наплавкой. Естественно, что наличие трещин (как концентраторов) приводит к существенному перераспределению напряжений.

После этого были проведены циклические испытания образцов с изгибающей нагрузкой на концентраторе для определения напряжений в вершине трещины и в ее окрестности. Для этого изготовили образцы из стали 20ГЛ и 20ГФЛ толщиной 9...12 мм и подвергали их циклической нагрузке силой 25 кН с периодическим статическим напряжением силой 30 кН. Такая схема напряжений имитирует реальные циклические эксплуатационные нагрузки на детали с периодическим проведением стендовых испытаний с применением метода АЭ с повышенной нагрузкой.

На пути развивающейся трещины установили тензодатчики (рисунок 2.5), с помощью которых фиксировали деформации и по ним определяли напряжения. При этом одновременно оценивали длину развивающейся трещины. Результаты измерений напряжений одного из образцов приведены на рисунке 2.6.

При испытании всех образцов трещина отклонялась от нормального развития, как правило, в области датчика № 1 или № 2. Тем не менее зафиксировано, что максимальное напряжение в вершине трещины составляло 800...900 МПа при прохождении ей рабочей поверхности под тензодатчиком. При дальнейшем развитии трещины максимум напряжений датчики фиксировали при ее прохождении в наиболее близкой к измерительному датчику точке.

Подводя итоги исследований напряжений в литых деталях, можно сказать, что точно оценить максимальные напряжения в разных литых деталях сложно. Проблема усугубляется чрезвычайно сильным разбросом толщин стенки и случайными внутренними дефектами литья в каждом сечении и боковой рамы и

надрессорной балки. Однако - максимальные значения напряженного состояния и частота его повторения для каждой детали соответствуют комбинированному воздействию разных сил, возникающих при движении вагона, и являются стохастическими величинами.

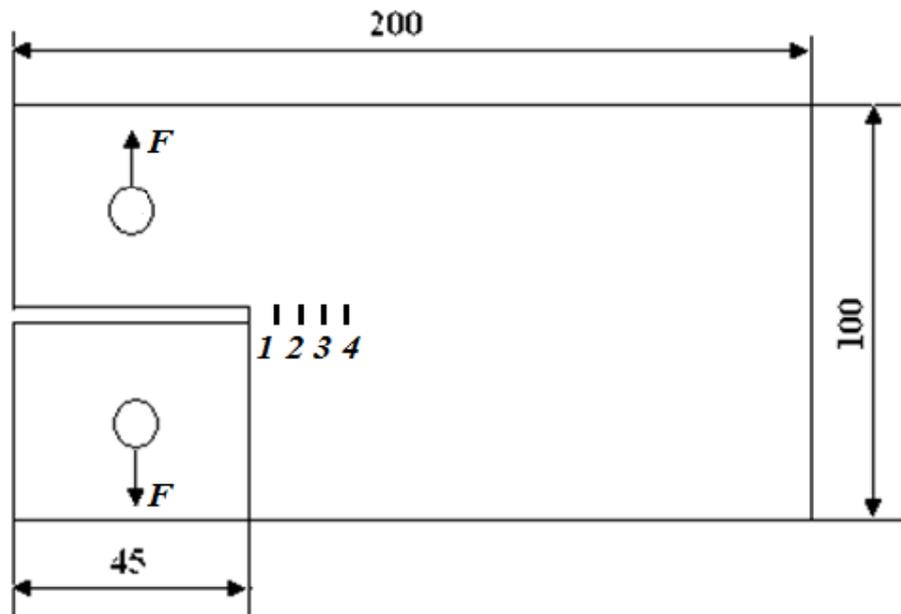


Рисунок 2.5 – Схема нагружения и установки тензодатчиков (№ 1–4)

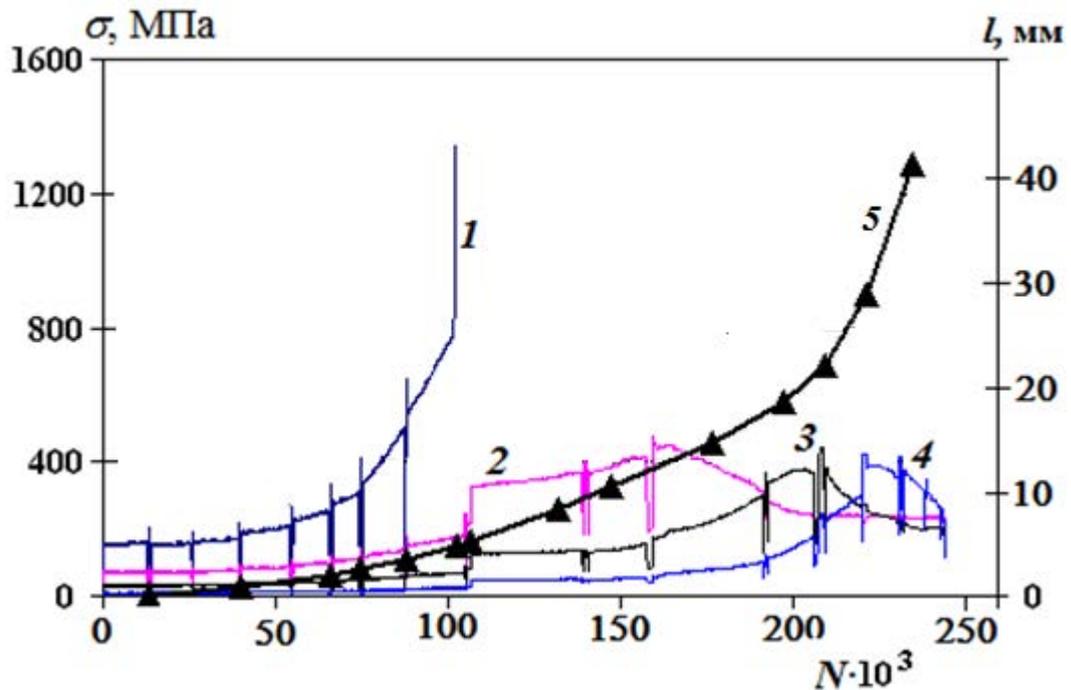


Рисунок 2.6 – Изменения напряжений на тензодатчиках 1, 2, 3, 4 и длины трещины (5) от искусственного концентратора – пропила в зависимости от числа циклов нагружений

В целом результаты исследований совпадают с результатами, представленными другими исследователями [192–194], и дополняют их. Однако следует отметить, что на развитие трещин больше всего влияют типы и размеры источников [195]. Поэтому для формирования адекватной картины степени опасности тех или иных дефектов и построения достоверной системы диагностирования необходимо дополнительно провести исследования влияния дефектности литых деталей с анализом надежности явных дефектов в них.

С практической точки зрения максимальное усилие для нагружения детали должно определяться формулой:

$$F_{\text{н}} = F_{\text{ст}} \cdot k_{\text{дин}} \cdot k_{\text{уд}} \cdot k_{\text{исп}}, \quad (2.1)$$

где  $k_{\text{дин}}$  – коэффициент динамической нагрузки;  $k_{\text{уд}}$  – коэффициент, учитывающий ударную нагрузку;  $k_{\text{исп}}$  – коэффициент повышения испытательной нагрузки (1,1...1,25). Коэффициент  $k_{\text{дин}}$  для необрессоренной боковой рамы равен 1,6, а для надрессорной балки 1,2. Тогда:

- вертикальная нагрузка боковой рамы (486...553) кН;
- горизонтальная нагрузка боковой рамы (102...117) кН;
- вертикальная нагрузка надрессорной балки (620...706) кН.

## **2.2. Анализ дефектности боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов**

Для того чтобы оценить влияние напряженного состояния на дефектообразование и скорость развития усталостных трещин в литых деталях тележки, было проведено исследование качественного состава дефектов и параметров обнаруживаемых усталостных трещин, по которым можно оценить скорость роста трещин

на различных участках. Результаты исследований, приведенные в предыдущем разделе, явно указывают на сильные различия в напряженном состоянии металла на этих участках. Вместе с тем картина выявляемых усталостных трещин показывает, что даже на участках с относительно малыми напряжениями образуются трещины.

Поэтому проанализируем дефектность разных литых деталей отдельно. Это позволит сделать определенные обобщения, необходимые допущения и требования к реализации системы диагностики при решении сложной задачи эффективной оценки технического состояния объектов такого класса.

Литые детали тележки грузового вагона являются одними из самых проблемных как с точки зрения процентного соотношения браковки по отношению ко всем проконтролированным деталям, так и с точки зрения вопросов достоверности результатов контроля. Это приводит к 3...8 % брака ежегодно. Современная система ремонта грузовых вагонов предусматривает периодическое диагностирование литых деталей тележки модели 18-100 с помощью визуально-измерительного, феррозондового и магнитопорошкового, АЭ методов НК, применяемых в зависимости от вида ремонтно-восстановительных работ.

В настоящее время на вагоноремонтных предприятиях накоплен значительный экспериментальный материал с результатами браковки боковых рам и надрессорных балок. Статистический анализ этих данных, приведенный в работах [196, 197], позволил разработать критерии оценки надежности существующей системы НК, установить проблемы системы диагностики, ремонта и эксплуатации боковых рам и надрессорных балок.

Общие статистические данные о браковке литых деталей были обработаны по результатам контроля 759 703 боковых рам и 372 748 надрессорных балок. Более подробный статистический анализ проводили по результатам НК 41 163 боковых рам и 22 893 надрессорных балок тележки 18-100 в трех вагоноремонтных депо. Из общего массива литых деталей основными объектами исследований являлись объекты с усталостными трещинами, как ремонтнопригодными, так и под-

лежащими браковке. Для всех обнаруженных усталостных трещин определяли их длину, участок и срок эксплуатации, при котором она была обнаружена.

Боковые рамы и надрессорные балки имеют сложную форму с большим количеством конструктивных концентраторов напряжений: технологические отверстия, углы, ребра жесткости. В материале деталей имеются технологические дефекты литья: поры, утяжины, раковины и дефекты сварки и наплавки, возникающие в процессе применения ресурсосберегающих технологий восстановления и защиты изнашиваемых поверхностей. Вопросы, связанные с развитием и оценкой опасности износов, подробно рассмотрены в работах [198, 199].

Общее число причин брака литых деталей в долях от общего числа забракованных деталей представлена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Долевое распределение причин браковки литых деталей тележек грузовых вагонов

Причина браковки	Доля забракованных деталей	
	Боковые рамы	Надрессорные балки
Трещины	0,45	0,78
Окончание назначенного нормативного срока службы	0,22	0,08
Износы	0,14	0,01
Наличие недопустимых литейных дефектов	0,11	0,06
Наличие следов сварки в наиболее ответственных зонах	0,08	0,07

Исходя из представленных в таблице 2.5 сведений видно, что достаточно большое соотношение бракуемых деталей имеют лишь потенциально опасные дефекты (превышение нормативного срока службы, литейные дефекты, наличие сварочных работ). Определить реальную степень опасности таких дефектов применяемыми средствами без привлечения АЭ метода невозможно.

Среди забракованных деталей выделили те, в которых были обнаружены усталостные трещины. Данные о распределении усталостных трещин по участкам в 40 506 боковых рамах и 15 369 надрессорных балках приведены на рисунке 2.7 и представлены в процентах к общему числу усталостных трещин в детали.

а)



б)



Рисунок 2.7 – Распределение усталостных дефектов в боковых рамах (а) и надрессорных балках (б)

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.7, наибольшее число усталостных трещин образуется в углах буксового проема боковых рам, причем подавляющее большинство – во внутреннем углу (49,3 %) и прилегающей опорной части буксового проема и над ней (29,4 %).

На наклонном поясе боковой рамы (а по данным подраздела 2.1 именно там имеется максимальное напряженное состояние) всего 3,8 % усталостных дефектов.

В надрессорной балке аналогичная ситуация: на участках максимальных расчетных напряжений – на кромках технологических отверстий верхнего пояса всего 1,7 % реально развивающихся усталостных трещин. Максимальное же количество усталостных трещин образуется в узлах трения – в наклонных плоскостях, опорной поверхности подпятника и участках, прилегающих к ним (78,7 %).

Наличие конструкционных и технологических концентраторов напряжений в условиях воздействия переменных нагрузок приводит к высокой вероятности образования и развития усталостных трещин. Например, к концу срока службы (30 лет) процент бракуемых при плановых видах ремонта по трещинам надрессорных балок достигает 23 %, а боковых рам – 7 % (рисунок 2.8).

В целом динамика изменения вероятности обнаружения усталостных трещин в боковых рамах и надрессорных балках в зависимости от времени эксплуатации приведена на рисунке 2.8.

С увеличением времени вероятность обнаружения усталостных трещин как в боковых рамах, так и в надрессорных балках монотонно возрастает. При этом вероятность обнаружения трещин в надрессорных балках более чем в три раза выше по сравнению с боковыми рамами. Это соответствует тому, что математическое ожидание среднего срока эксплуатации надрессорной балки меньше по сравнению с боковой рамой и меньше нормативного срока работы. В то же время для боковой рамы средний срок эксплуатации выше нормативного срока и определить его в настоящее время без дополнительных специальных исследований невозможно.

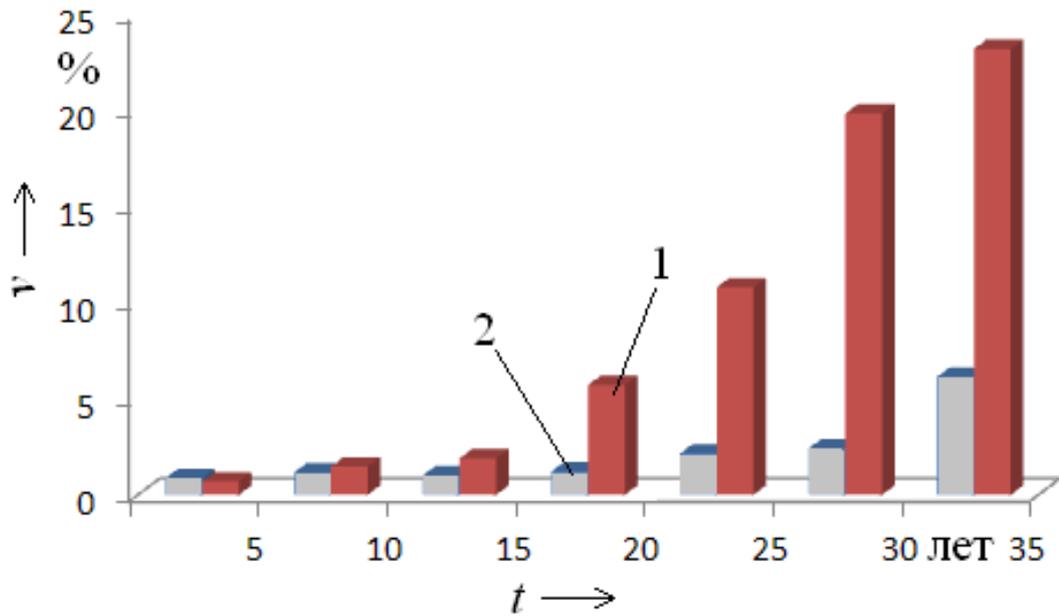


Рисунок 2.8 – Зависимость количества выявленных усталостных трещин в процентах от числа проконтролированных деталей от времени эксплуатации надressорных балок (1) и боковых рам (2)

При дальнейшем анализе полученных результатов исходили из того, что вероятность  $p(l)$  обнаружения трещины определенной длины  $l$  в детали, отработавшей интервал времени  $\Delta t$ , является произведением вероятности его существования на момент времени диагностики  $f(l)$  и вероятности надежности его обнаружения  $g(l)$  системой «дефектоскопист–средства контроля», так как размеры усталостных трещин имеют зависимость от времени работы деталей [200]:

$$p(l) = f(l) \cdot g(l). \quad (2.1)$$

В результате сбора экспериментальных статистических данных можно получить параметр  $p(l)$ . Параметр  $f(l)$  удовлетворительно описывается экспоненциальным законом [201]. При этом параметр  $g(l)$  удовлетворяет условиям:

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

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

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

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

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

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

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

Косвенно степень надежности контроля данного типа дефекта иллюстрирует низкий уровень отказов деталей в процессе эксплуатации между ремонтами. Для литых деталей тележек грузовых вагонов этот показатель ниже 0,01 %, что позволяет использовать предложенную модель.

Экспериментальное распределение выявленных усталостных трещин в зависимости от их длины в боковых рамах представлено на рисунке 2.9, а в надрессорных балках – на рисунке 2.10, где по оси абсцисс отложена длина трещины, разбитая на диапазоны по 10 мм, а по оси ординат – частота обнаружения трещин данного размера.

При этом массив данных сознательно разделен на три выборки в зависимости от времени эксплуатации деталей. Это было сделано для того, чтобы оценить влияние на рост усталостных трещин таких факторов, как вклад наследственных дефектов со стадии производства (для деталей со сроком эксплуатации менее 11 лет) и усталость металла (для деталей со сроком эксплуатации 21 год и более).

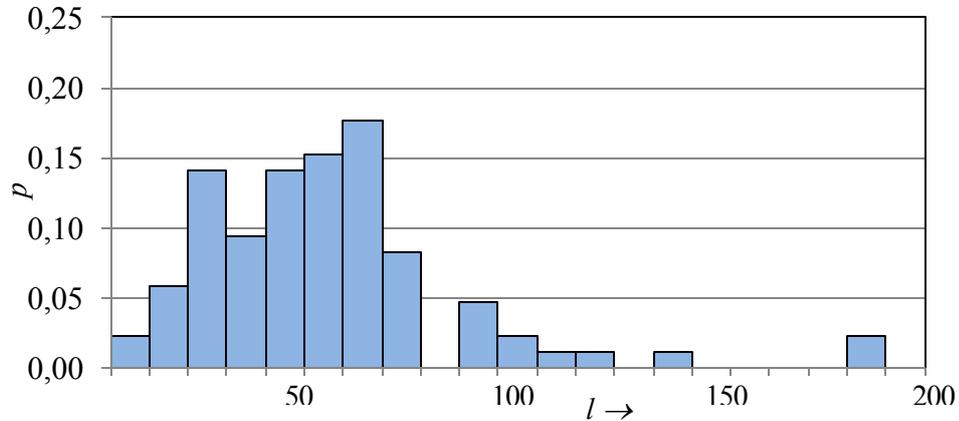
Для того чтобы определить степень сходимости или различия полученных результатов, рассчитали коэффициент корреляции экспериментальных распределений относительных вероятностей обнаружения дефектов по их размерам для деталей с различными сроками службы по формуле:

$$k_b = \frac{\sum_{i=1}^n (p_b^{y_1}(l_i) - \langle p_b^{y_1} \rangle) \cdot (p_b^{y_2}(l_i) - \langle p_b^{y_2} \rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_b^{y_1}(l_i) - \langle p_b^{y_1} \rangle)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (p_b^{y_2}(l_i) - \langle p_b^{y_2} \rangle)^2}}, \quad (2.2)$$

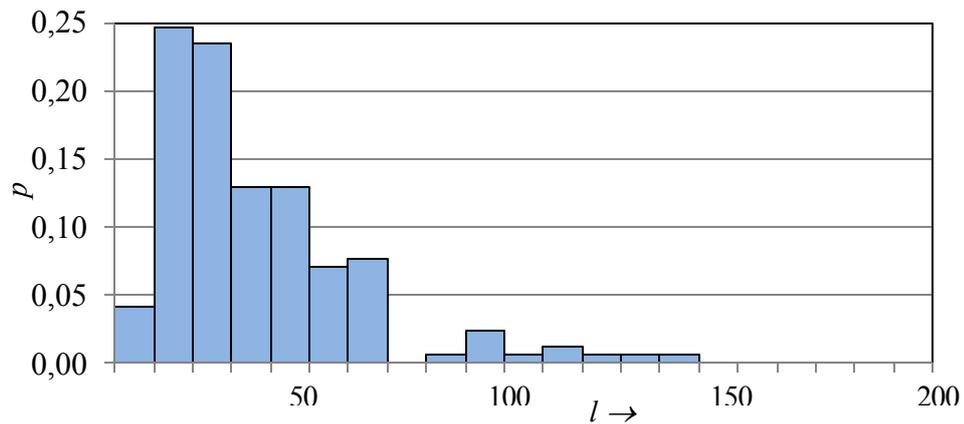
где  $p_b^{y_1}(l_i)$  – относительная вероятность обнаружения дефекта с размерами от  $l_{i-1}$  до  $l_i$  в боковых рамах (индекс  $b$ ) со сроками службы  $y_1$ , отн. ед.;  $l_i = 20 \cdot i$  – массив

интервалов длин трещин, мм;  $i = 1 \dots n$  – индекс массива интервалов длин трещин;  
 $n$  – максимальное количество интервалов распределения трещин по длине.

а)



б)



в)

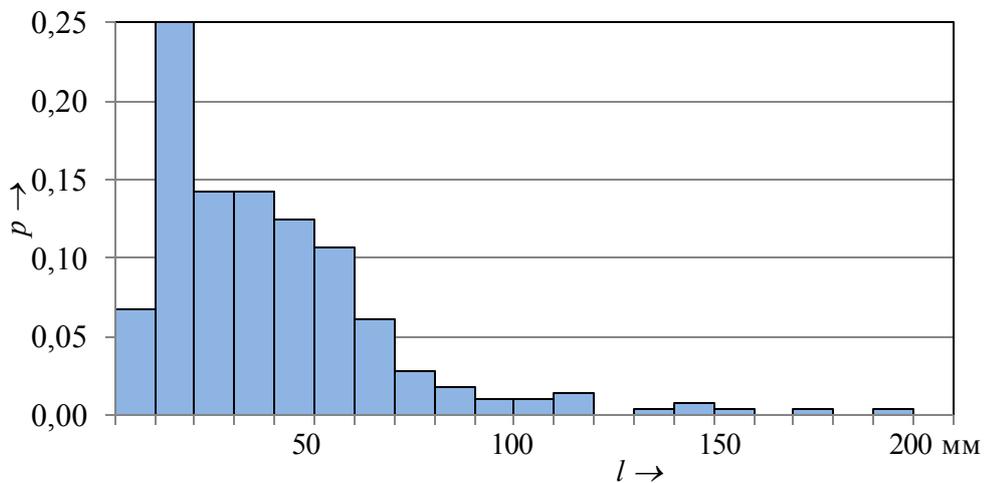
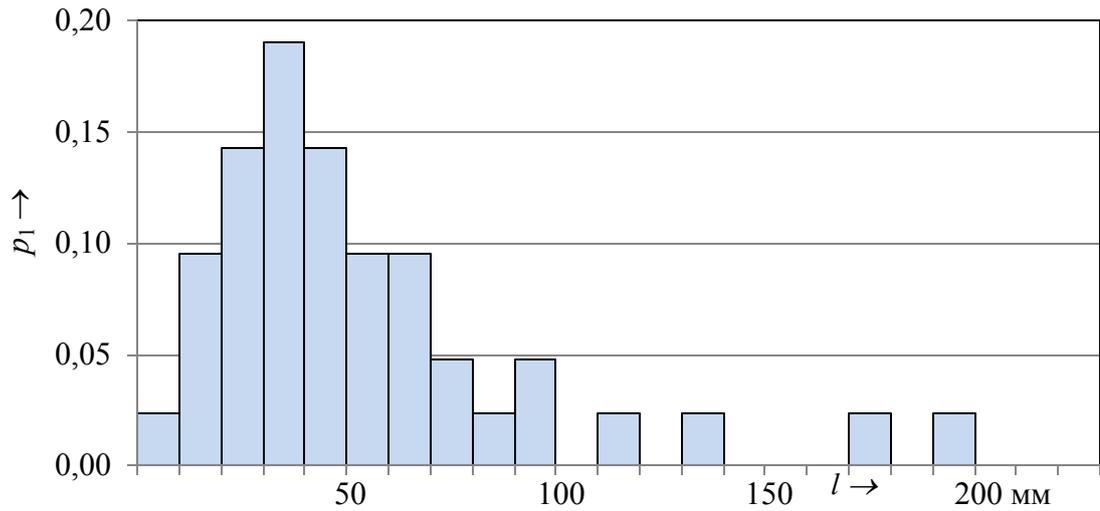
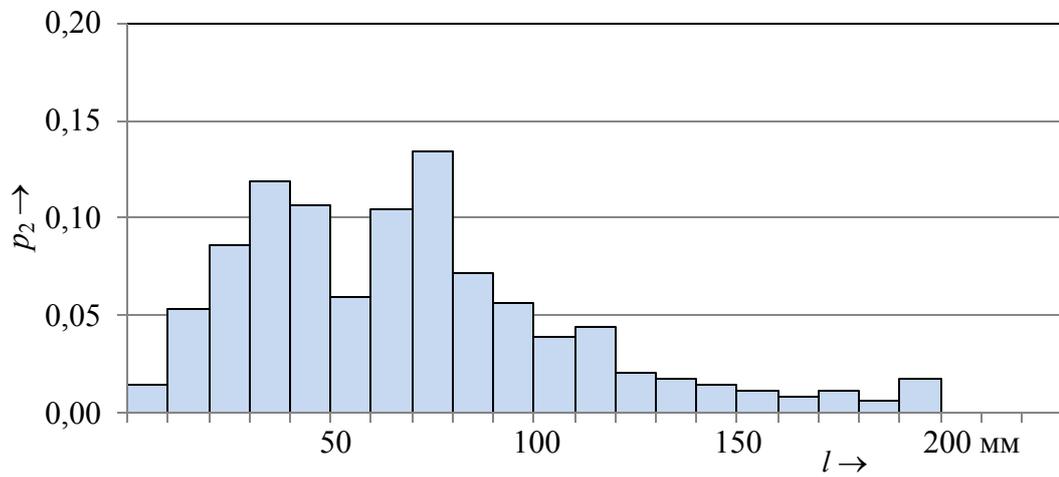


Рисунок 2.9 – Распределение относительной вероятности обнаружения дефектов по их размерам в боковых рамах тележки модели 18-100 со сроком эксплуатации 1–10 лет (а), 11–20 лет (б) и 21–30 лет (в)

а)



б)



в)

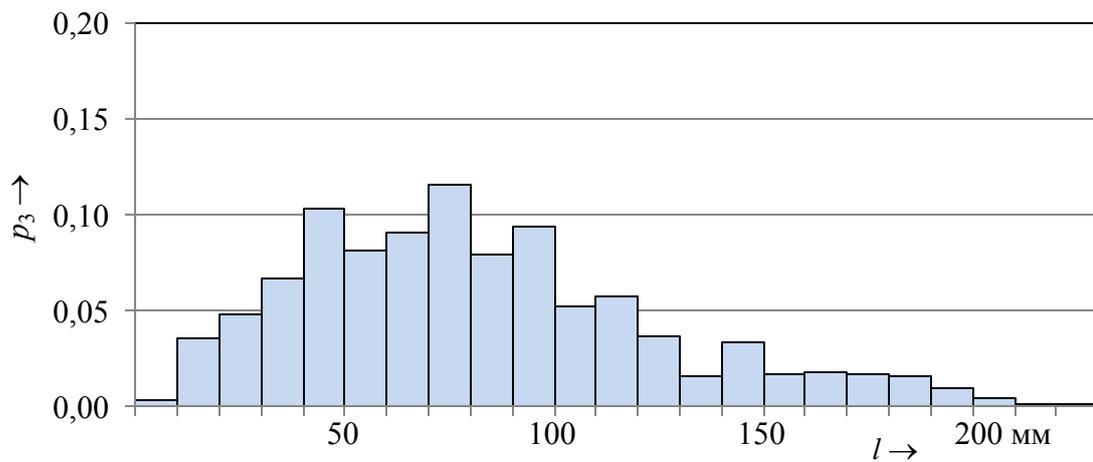


Рисунок 2.10 – Распределение относительной вероятности обнаружения дефектов по их размерам в надрессорных балках тележки модели 18-100 с сроком эксплуатации 1–10 лет (а), 11–20 лет (б) и 21–30 лет (в)

Результаты этих расчетов приведены в таблице 2.6 и показывают, что наибольшей корреляцией обладают массивы распределений вероятности обнаружения трещин в зависимости от длины со сроками эксплуатации 11–20 лет и 21–30 лет.

Таблица 2.6 – Коэффициенты корреляции распределений относительных вероятностей обнаружения дефектов по размерам в боковых рамах и надрессорных балках с разными сроками службы

Сроки службы $y_1$ , лет	Срок службы, $y_2$ , лет	Коэффициент корреляции	
		Надрессорные балки	Боковые рамы
От 1 до 10	От 11 до 20	0,79	0,35
От 1 до 10	От 21 до 30	0,57	0,25
От 11 до 20	От 21 до 30	0,89	0,91

Другим фактором, снижающим значения коэффициента корреляции между данными, взятыми за разные периоды, является относительно малая выборка количества учтенных деталей на ранних стадиях эксплуатации. Число учтенных боковых рам с трещинами за период эксплуатации 1–10 лет составило всего 85 шт., а надрессорных балок еще меньше – 42 шт.

Вместе с тем коэффициент корреляции длин обнаруживаемых трещин со сроком эксплуатации боковых рам и надрессорных балок как для всего временного интервала сроков эксплуатации, так и для его отдельных интервалов не превышал 0,25. Это свидетельствует об отсутствии линейной связи между этими параметрами, а значит, усталостные трещины в основном успевают развиваться из незначительных или скрытых дефектов в интервале межремонтной эксплуатации.

Представление обобщенных данных распределения трещин по длинам в виде точек позволяет выдвинуть гипотезу об экспоненциальной зависимости вероятности появления и развития трещин в любой момент времени эксплуатации.

Пример такого рода представления данных приведен на рисунке 2.11. Аналогично в виде экспоненциальной зависимости можно представить данные по обнаруженным длинам трещин в боковых рамах.

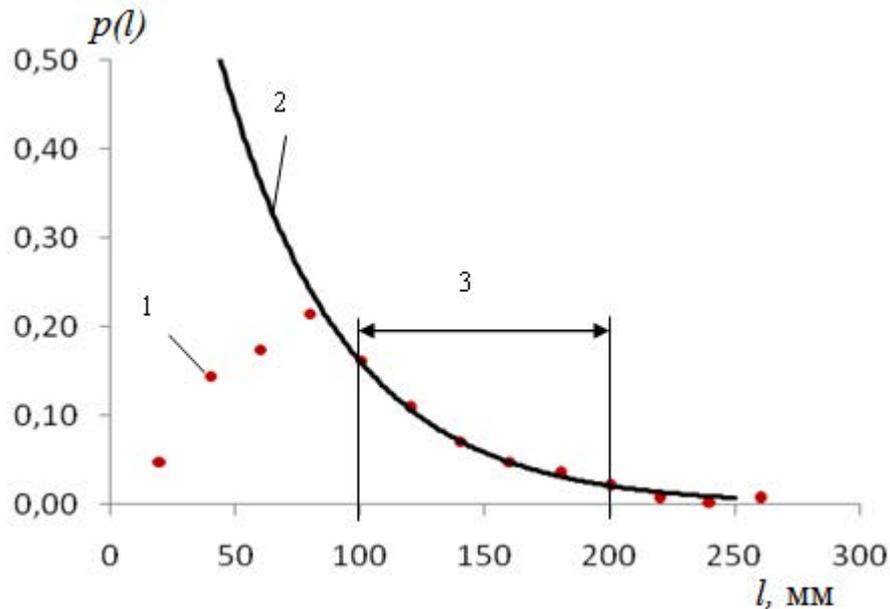


Рисунок 2.11 – Экспериментальная зависимость относительной вероятности обнаружения дефекта в надрессорных балках от его длины ( $l$ ) и аппроксимация экспоненциальной зависимостью (2) по данным в диапазоне (3) от 100 до 200 мм

Результаты аппроксимации экспоненциальной зависимостью экспериментальных данных для надрессорных балок и боковых рам соответственно:

$$f_b(l) = 1,23 \cdot \exp(-0,020 \cdot l), \quad (2.3)$$

$$f_r(l) = 2,95 \cdot \exp(-0,041 \cdot l). \quad (2.4)$$

Проверку гипотезы о применимости экспоненциального распределения для описания «хвоста» (трещины длиной свыше 100 для надрессорных балок и свыше 60 мм для боковых рам) экспериментального распределения трещин провели с использованием критерия Пирсона. Для надрессорных балок значение коэффициента составило  $\chi^2 = 1,19$  при трех степенях свободы, для боковых рам –  $\chi^2 = 3,78$  при двух степенях свободы. Гипотеза была принята, так как эти коэффициенты не превышают критических с уровнем значимости 0,05 значений распределения  $\chi^2$  4,82 и 5,99 соответственно [201].

Проведенные исследования показывают, что часть трещин малых размеров существующей системой дефектоскопии не идентифицируется. Однако процесс формирования и развития усталостных трещин от источников размером менее 5 мм для боковых рам и 17 мм для надрессорных балок на большинстве участков укладывается в межремонтный период эксплуатации.

Существенная разница в размерах обнаруживаемых дефектов требует дополнительных исследований выявляемости трещин на других деталях. В связи с этим был собран материал, содержащий выявленные усталостные трещины в корпусах автосцепных устройств и тяговых хомутов, как наиболее близких по физико-механическим свойствам, характеру нагруженного состояния. Проведенная обработка результатов контроля литых деталей автосцепного устройства приведена в работе [202].

С учетом перераспределения неискаженных данных по длине усталостных трещин в литых деталях автосцепного устройства провели перерасчет долевых соотношений распределений. Результаты аппроксимации экспоненциальной зависимости данных для корпусов автосцепных устройств выражается зависимостью

$$f_a(l) = 0,06 \cdot \exp(-0,04 \cdot l), \quad 2.5$$

а для тяговых хомутов

$$f_r(l) = 0,04 \cdot \exp(-0,025 \cdot l). \quad 2.6$$

Исходя из полученных формул можно определить следующие важные значения размеров трещин:

– максимальную длину трещин, которые действующими методами НК не обнаруживаются или не идентифицируются, как трещины с вероятностью 95 %, т. е. в заданных условиях контроля это минимальный размер выявляемых трещин, вызванных ограничениями аппаратуры и метода. Для тяговых хомутов этот параметр имеет значение 4 мм, для корпусов автосцепок – 2 мм;

– минимальную длину трещин, которые надежно обнаруживаются с вероятностью 95 %, для корпусов автосцепок этот размер составляет 14 мм, для тяговых хомутов – 37 мм.

Следовательно, дифференцированный подход необходим даже при диагностике относительно несложных деталей, имеющих различные площади сечений и нагруженное состояние.

Полученные данные статистического анализа по всем данным показывают, что существующие условия и система НК не позволяет обеспечивать одинаковую вероятность выявления усталостных трещин как для боковых рам и надрессоных балок грузовых вагонов, так и для других литых деталей, в частности – автосцепного устройства.

Проведенный анализ показывает, что одни и те же работники, используя идентичные средства дефектоскопии на конструктивно разных деталях, изготовленных из одних марок сталей и одинаковым способом, выявляют трещины с различной вероятностью, что свидетельствует в первую очередь о методическом несовершенстве существующей технологии контроля. Система НК литых деталей грузовых вагонов требует методической, а возможно, и методологической модернизации, которая позволит обеспечить одинаковую выявляемость дефектов в разных деталях. Это связано с основной идеей ремонтных работ – создать максимально одинаковый межремонтный ресурс деталей и узлов, обеспечив таким образом минимальные затраты на содержание ходовой части вагонов.

Однако, учитывая существенные различия в напряженном состоянии разных участков боковых рам и надрессорных балок, и, как следствие, существенные количественные различия в отбраковываемых деталях, необходимо рассмотреть отдельно статистические данные по развитию трещин в разных зонах этих деталей и определить, насколько сильно эти различия выливаются в статистических результатах. Дополнительно следует отметить, что дефекты малых размеров типа трещин не всегда носят усталостный характер и без металлографического исследования точно определить природу формирования такого дефекта сложно. Поэтому количество дефектов, идентифицируемых как усталостные трещины малых размеров, согласно статистическим расчетам по примененной методике, – является преувеличенным.

На следующем этапе статистических исследований были выделены различные данные об усталостных трещинах, обнаруженных на разных участках литых деталей [196, 202]. Учитывая существенные различия в напряженном состоянии, распределение числа забракованных деталей по разным участкам было неравномерным. Так как малые выборки дают существенные статистические погрешности, было решено проанализировать только участки литых деталей, на которых обнаружено более ста усталостных трещин.

У боковых рам с дефектами во внутреннем углу буксового проема в выборку было включено 326 усталостных трещин, а в наклонном поясе – 163 трещины.

Распределение вероятности обнаружения трещин во внутреннем углу буксового проема и в наклонном поясе боковой рамы от длины обнаруженных трещин показаны на рисунке 2.12.

Приведенные результаты исследований доказывают, что трещины длиной более 100 мм практически не обнаруживаются в наклонных поясах боковых рам. Кроме того, и разрушения в процессе эксплуатации в этой области происходят чрезвычайно редко. Все это подтверждает достаточно высокую вероятность образования усталостных трещин в этой области. С другой стороны – приведенные данные говорят о низкой скорости развития трещин на этом участке.

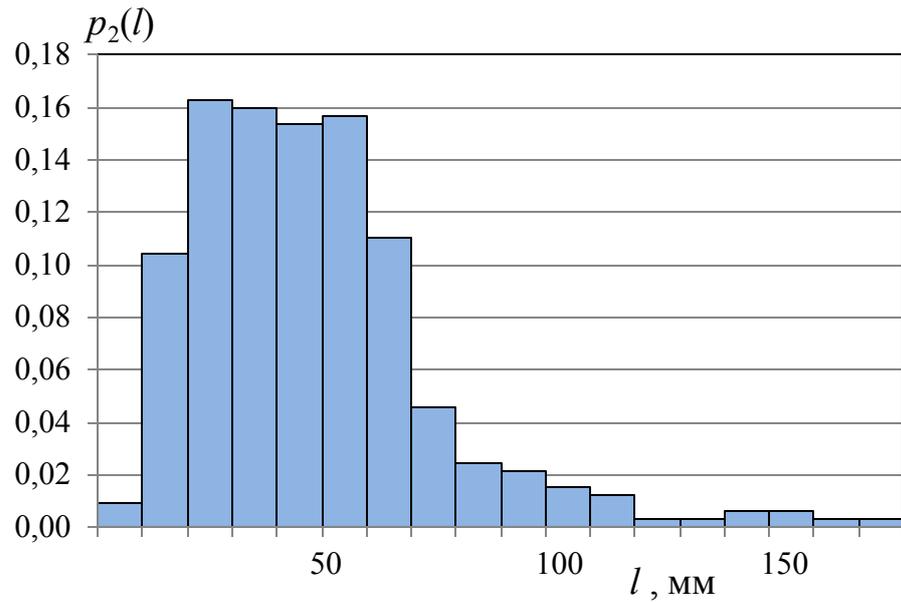
Чтобы определить уравнение экспоненциальной зависимости истинного распределения вероятности обнаружения трещин от заданной длины трещины, определили плотности вероятности для среднего значения каждого интервала по формуле

$$\rho(l) = p(l)/\Delta l,$$

где  $\Delta l$  – величина интервала, равная 10 мм.

Полученное распределение плотности вероятности позволило найти расчетную функцию с наибольшим коэффициентом корреляции 0,969, оно согласуется с экспоненциальным распределением с коэффициентом  $\sigma = 27$ . Графически экспериментальная и расчетная кривые плотности распределения трещин по длине в наклонном поясе боковых рам приведена на рисунке 2.13.

a)



б)

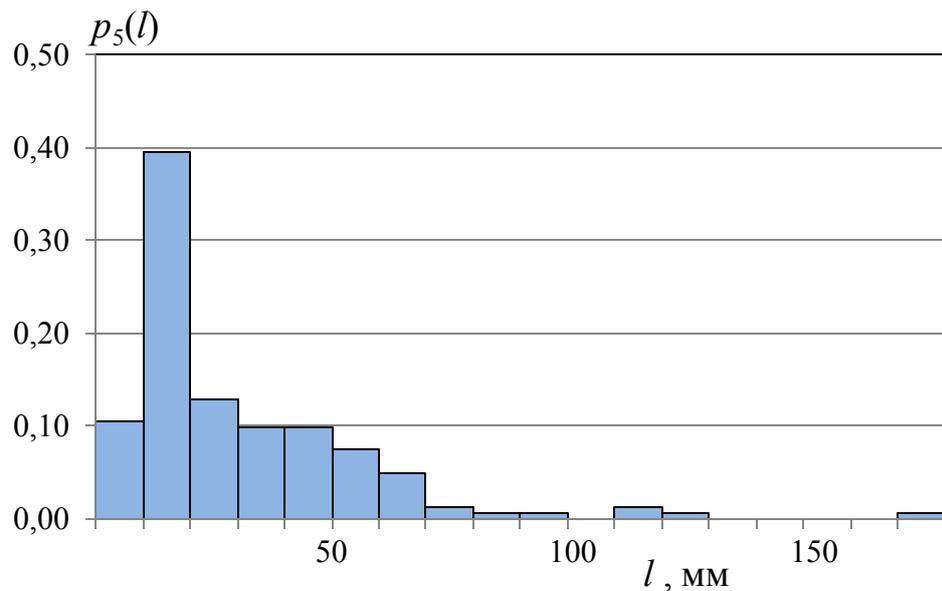


Рисунок 2.12 – Распределение усталостных трещин во внутреннем углу буксового проема (а) и в наклонном поясе (б) в зависимости от длины трещины на момент периодического контроля

Аналогичное представление данных плотности вероятности распределения трещин по длинам во внутреннем углу буксового проема показала, что коэффициент равен  $\sigma = 16,5$ . Это означает, что во внутреннем углу буксовых проемов боковых рам скорость роста трещин действительно выше, чем во всех других зонах боковых рам. Следовательно, подтверждается гипотеза о влиянии на развитие

трещин комплексного сложно нагруженного состояния этих деталей в процессе эксплуатации.

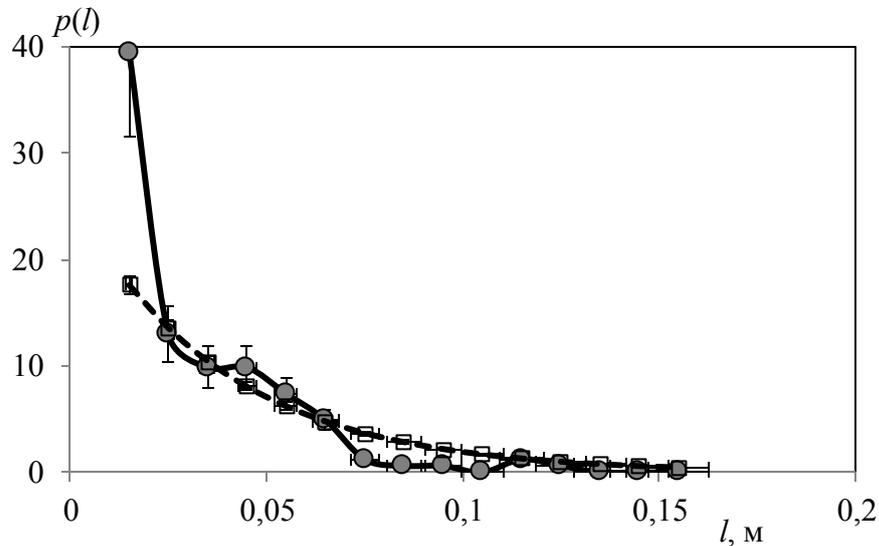


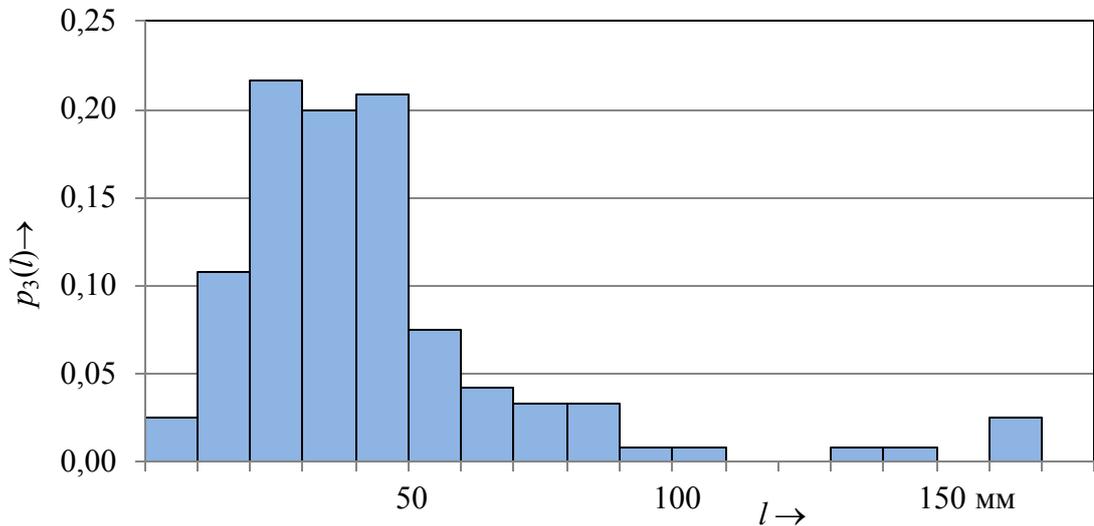
Рисунок 2.13 – Представление экспериментально определенной (сплошная линия) и расчетной (пунктир) плотностей вероятности обнаружения усталостных трещин заданной длины в наклонном поясе боковых рам

Кроме того, завышенные экспериментальные данные плотности в области малых длин трещин подтверждают, что часть из них не является усталостными и требует применения методов оценки, определяющих способность этих дефектов к развитию. Превышение статистических реальных данных над расчетной кривой распределения соответствует числу перебраковок литых деталей при НК в условиях периодического освидетельствования в депо.

Аналогичный статистический позонный анализ был проведен для двух наиболее дефектных участков надрессорных балок. Такими зонами являются наклонные плоскости и опорная поверхность подпятника. Всего выборка трещин в наклонных поверхностях составила 1 115 деталей, а в подпятнике – 120. Остальные зоны статистически менее значимы и имеют существенно меньшую достоверность при обработке результатов из-за малых выборок.

Распределение вероятностей обнаружения трещин в заданном интервале длин в наиболее подверженных усталостным изменениям зонах надрессорных балок представлено на рисунке 2.14.

*a)*



*б)*

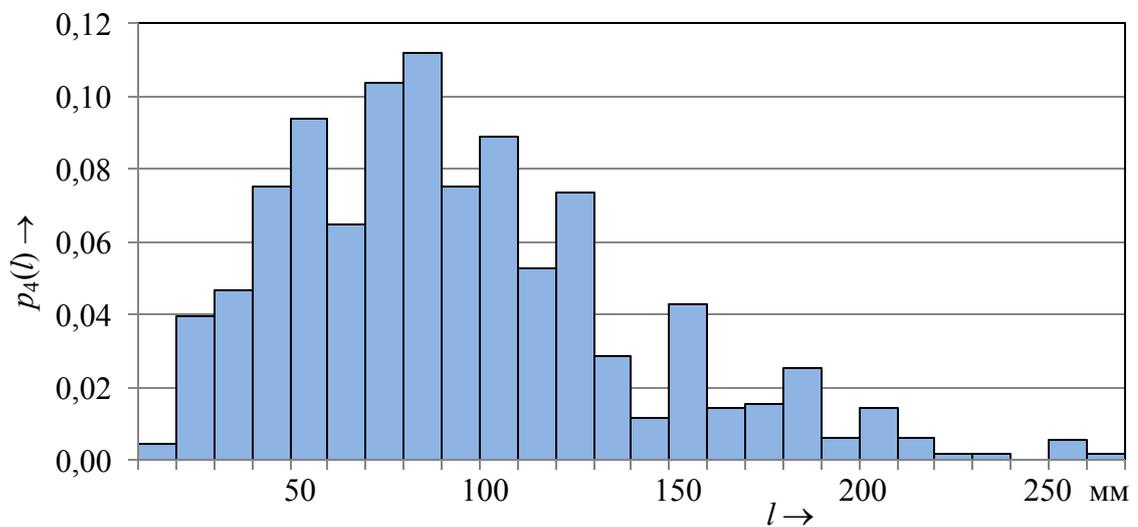


Рисунок 2.14 – Распределение усталостных трещин в опорной поверхности подпятника (*a*) и в наклонных плоскостях (*б*) надрессорной балки в зависимости от длины трещины на момент периодического контроля [203]

Приведенные результаты контроля надрессорных балок показывают сильное различие в распределении усталостных трещин по их длине в двух наиболее дефектных зонах контроля. Среднее значение и медиана распределения трещин в зависимости от длины в опорной поверхности подпятника существенно меньше

этих статистических показателей относительно трещин в наклонных плоскостях. Это свидетельствует также о различной скорости развития трещин на приведенных участках.

Исходя из приведенных статистических данных для участков литых деталей можно построить кривые средней скорости роста трещин, например на рисунке 2.15 приведены средние скорости роста трещин в двух зонах боковых рам.

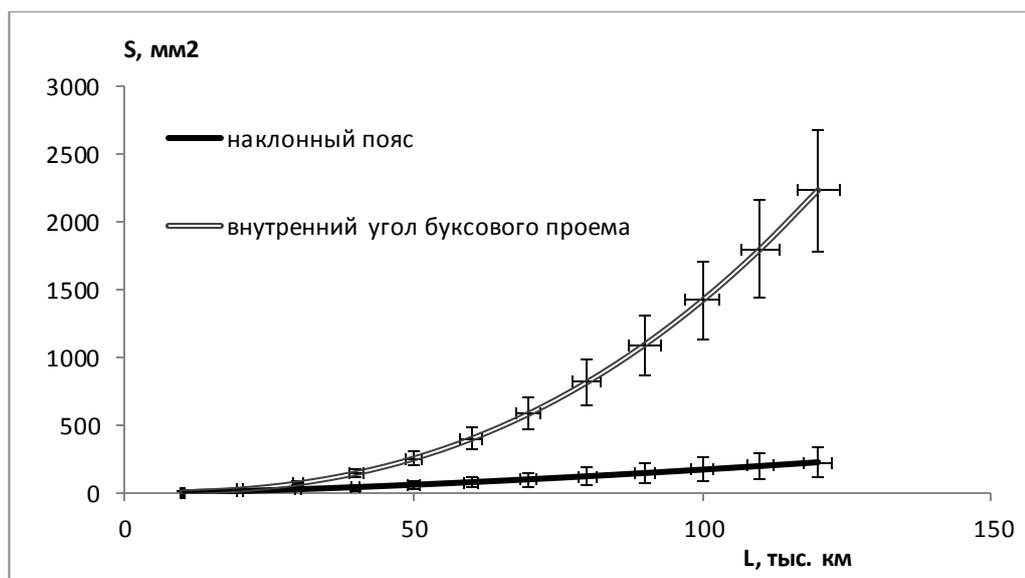


Рисунок 2.15 – Эмпирическая связь пробега вагона со средней площадью развивающихся трещин

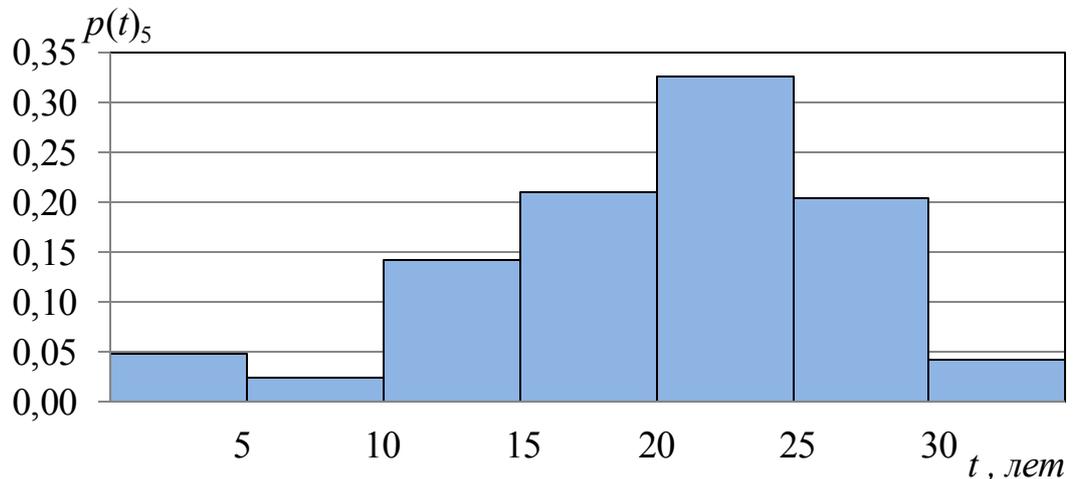
Затем те же самые выборки забракованных боковых рам и надрессорных балок были проанализированы с точки зрения частоты обнаружения этих дефектов в интервалах эксплуатации, кратных пяти годам. Эти данные показывают степень зависимости усталостных дефектов от производственных факторов и динамику развития усталостного состояния в областях с наиболее часто встречающимися дефектами.

Например, распределение вероятностей обнаружения трещин в интервалы времени эксплуатации в боковых рамах представлены на рисунке 2.16.

Из рисунка 2.16 видно, что для наклонного пояса и углов буксового проема существует отличие в распределении вероятностей обнаружения трещин в заданные временные интервалы длиной в 5 лет. Например, на наклонном поясе в пер-

вые пять лет эксплуатации обнаруживают около 5 % трещин, а в углах буксовых проемов – около 13 %. Это свидетельствует о том, что в буксовом проеме при производстве скрытых значительных дефектов примерно в 2,5 раза больше по сравнению с наклонным поясом.

*a)*



*б)*

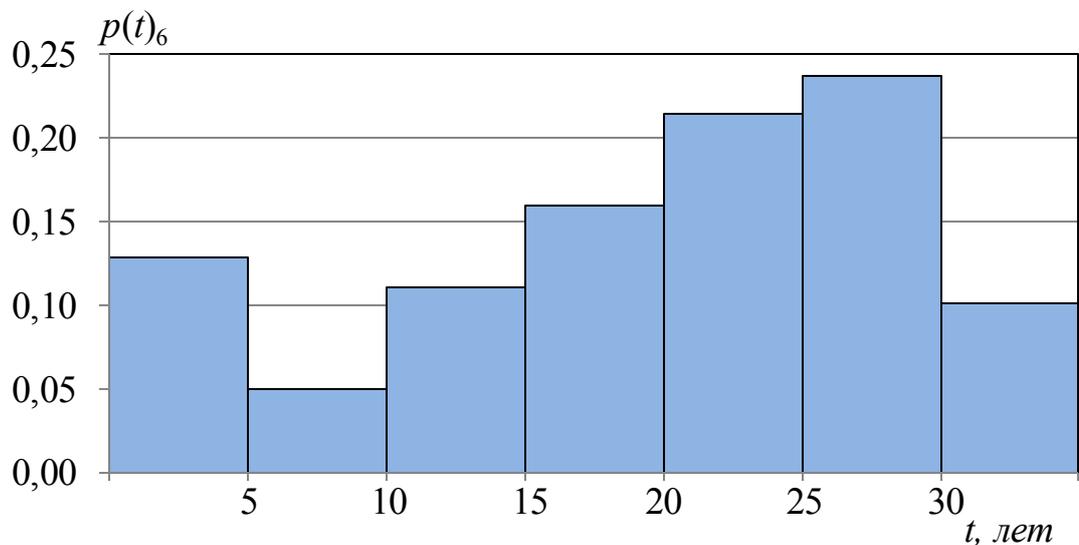


Рисунок 2.16 – Распределение вероятностей обнаружения усталостных трещин в зависимости от интервала времени эксплуатации в наклонных плоскостях (*a*) и подпятниковой области (*б*) надрессорных балок

Принципиально похожие результаты показывает распределение вероятности обнаружения трещин на участках надрессорных балок.

Приведенные данные можно описать только суммой долевых функций. Таким образом, в общем случае распределение, представленное на рисунке 2.16, но-

сит непрерывный характер и может быть представлено суммой долевых распределений Вейбулла–Гнеденко. Тогда плотность вероятности перехода к ускоренному развитию трещины от времени эксплуатации в  $i$ -й зоне (а чаще всего именно в окрестности этого момента происходит регистрация усталостной трещины при НК) выражено формулой:

$$p_i(t) = a_1 \cdot \frac{k_1}{1} \cdot \left(\frac{t}{1}\right)^{k_1-1} e^{-\left(\frac{t}{1}\right)^{k_1}} + a_2 \cdot \frac{k_2}{2} \cdot \left(\frac{t}{2}\right)^{k_2-1} e^{-\left(\frac{t}{2}\right)^{k_2}}, \quad (2.7)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – долевые коэффициенты;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $1$  и  $2$  – масштабные коэффициенты распределения Вейбулла–Гнеденко. Долевой коэффициент  $a_1$  характеризует долю скрытых значительных дефектов в зоне литой детали, склонных к развитию уже в гарантийный период эксплуатации. Долевой коэффициент  $a_2$  характеризует распределение вероятности появления дефектов в деталях без учета влияния производственных выраженных литейных пороков. Такое распределение наиболее полно подходит к подобного рода статистически распределенным данным, а его параметры служат индикатором усталостной эволюции металла в локальных зонах. Коэффициенты распределения служат индикаторами реального напряженного состояния металла в каждой зоне контроля. Конечно, наиболее востребованы данные о дефектах в максимально нагруженных областях деталей.

### **2.3. Исследования причин разрушения литых деталей тележки грузовых вагонов**

Несмотря на сложную систему производственного и эксплуатационного контроля, за последние годы в процессе эксплуатации регулярно разрушаются литые детали. Причины таких разрушений во всех случаях – доллом усталостных

трещин под эксплуатационной нагрузкой. Это означает две основные причины подобных разрушений:

- недостаточно эффективная система НК, при которой возможны пропуски значительных дефектов, быстро развивающихся в эксплуатации;
- быстрый рост некоторых видов трещин, у которых интервал времени между достижениями размеров, когда они могут быть обнаружены, до долома меньше междиагностического периода.

Всего с 2005 по 2016 г. включительно произошло 158 разрушение боковых рам и четыре разрушения надрессорных балок, что составляет около 0,014 % от общего числа проконтролированных за этот период боковых рам и 0,001 % надрессорных балок. Характерно то, что почти все изломы боковых рам произошли во внутреннем углу буксового проема, а надрессорных балок – в средней части. Это говорит о том, что доминирующими при разрушении нагрузками являются комплексные – включая боковые при движении в кривых, возникающих при торможении и ускорении поездов, а также вследствие ударных воздействий в болтовых стыках рельсов и при наличии дефектов колес, рельсов в местах их сопряжения.

Распределение разрушенных деталей в зависимости от завода-изготовителя не прослеживается, так как число разрушений примерно эквивалентно числу произведенных деталей с небольшими статистическими отклонениями. Учитывая, что выборка из 145 деталей достаточно невелика, то следует признать, что влияние грубых ошибок производства в складывающейся ситуации минимально.

Выборка боковых рам позволяет делать определенную статистическую обработку, в отличие от выборки надрессорных балок, разрушение которых можно признать случайным процессом.

У всех разрушенных боковых рам известен год изготовления, что позволяет посмотреть их распределение по сроку службы. Распределение боковых рам по времени эксплуатации до разрушения представлено на рисунке 2.17, из которого видно, что подавляющее большинство деталей (почти 75 %) было разрушено в срок до трех лет. Это напрямую говорит о наличии скрытых значительных дефек-

тов, которые быстро развиваются. После восьми лет эксплуатации все разрушения носят случайный характер и не имеют статистической значимости.

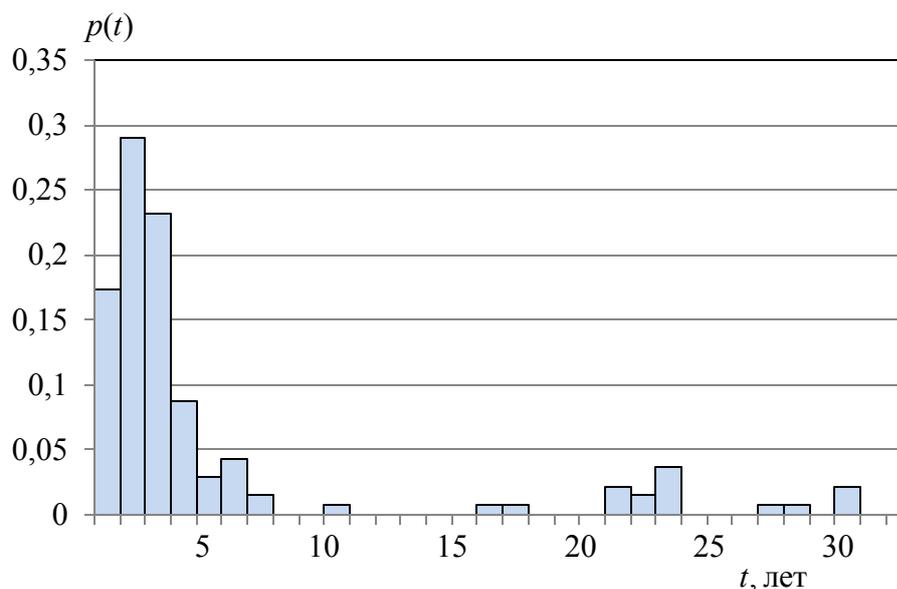


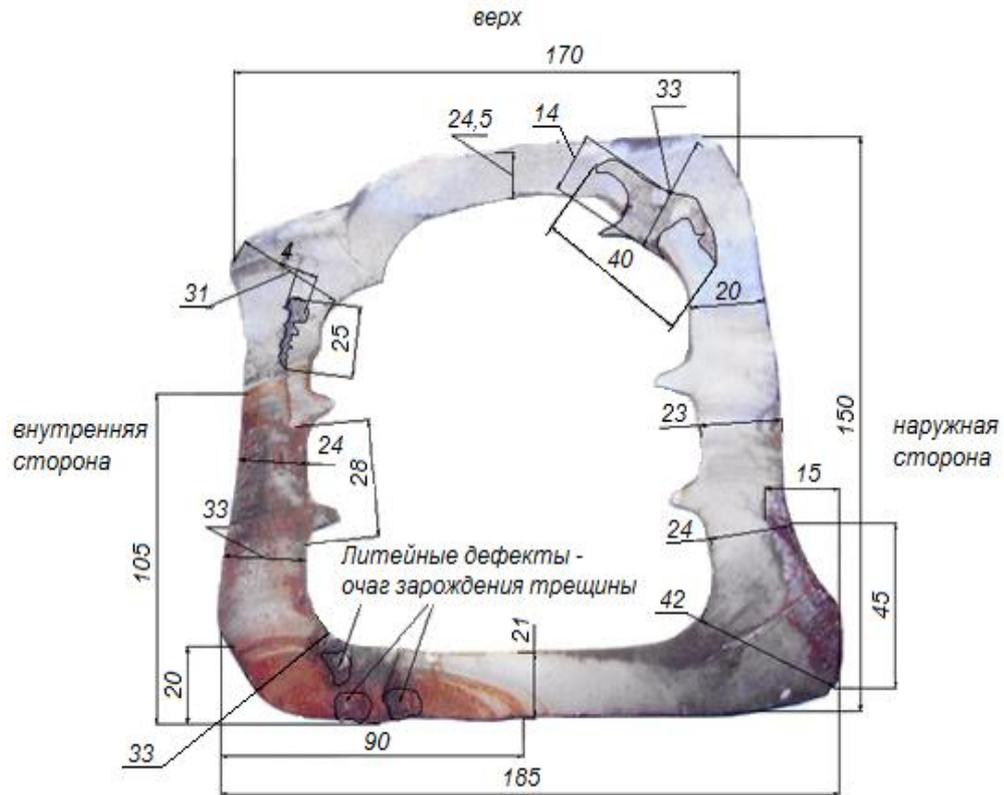
Рисунок 2.17 – Долевое распределение изломов боковых рам по округленному числу лет эксплуатации

Разрушение боковых рам также носит в подавляющем числе случаев однотипный характер. Избыточное напряженное состояние, приводящее к разрушению, испытывают внутренние углы буксового проема. Типичный механизм развития трещины можно проследить по структуре сечения разрушения, которая представлена на рисунке 2.18.

Очаг зарождения подавляющего большинства трещин боковых рам находится в нижней горизонтальной части внутреннего угла буксового проема. Очаг зарождения трещин:

- может быть литейного происхождения (рисунок 2.18, *а*; рисунок 2.19) – раковины, недоливы, неслитины и т.п.;
- может быть от внешнего механического повреждения (рисунок 2.20), произошедшего в ходе эксплуатации;
- может не иметь макроскопических внешних источников повреждений (рисунок 2.18, *б*; рисунок 2.21) – чисто усталостные трещины.

а)



б)

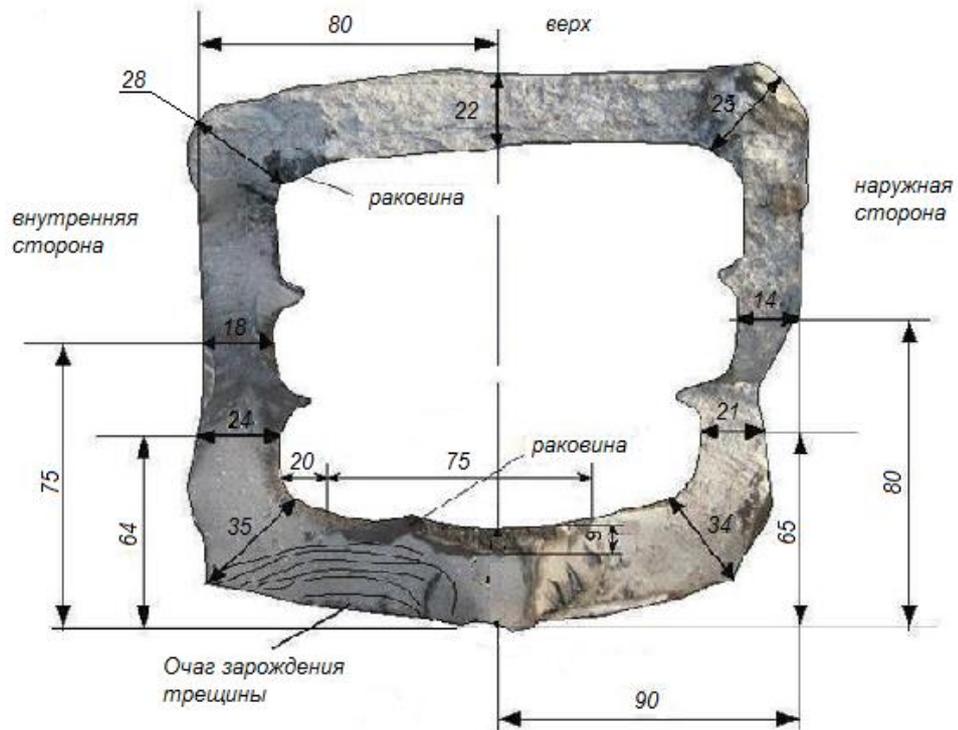


Рисунок 2.18 – Результаты измерений изломов боковых рам № 7908 (а) и № 36213 (б)



Рисунок 2.19 – Изломы боковых рам № 14163 (а) и № 33143 (б)  
с источником – литейным дефектом, выходящим на поверхность

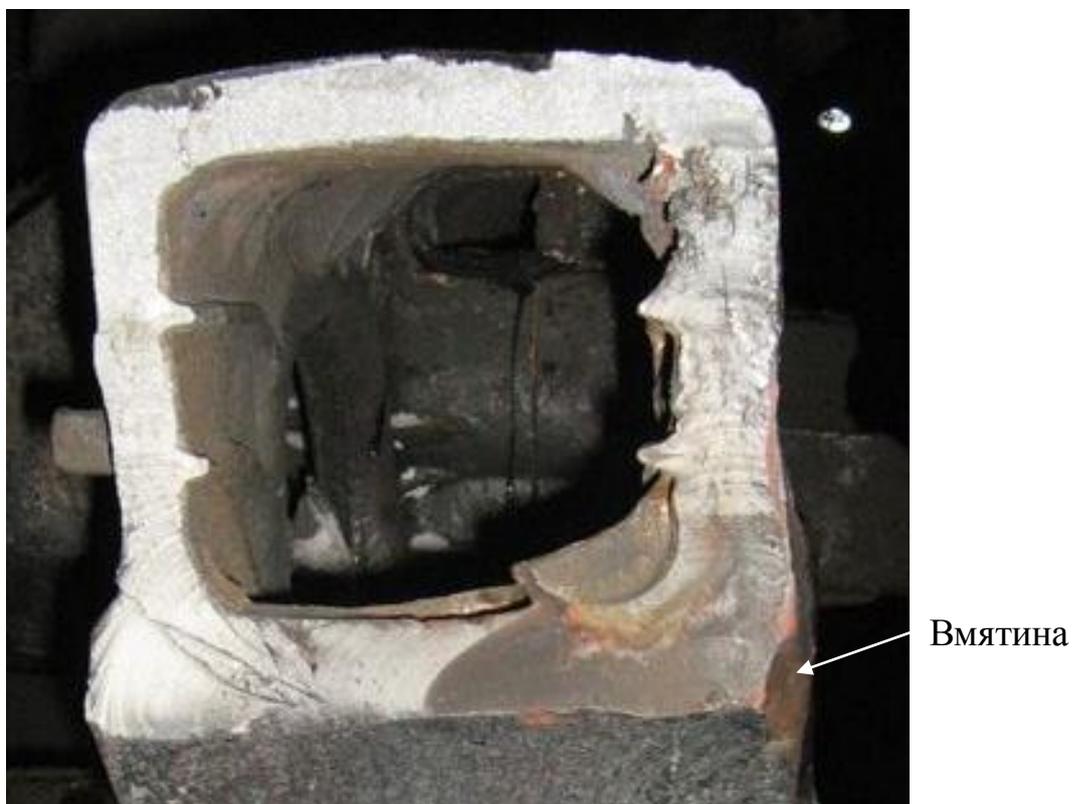


Рисунок 2.20 – Излом боковой рамы № 26228

*a)**б)*

Рисунок 2.21 – Вид изломов боковых рам № 37744 (*a*) и № 39522 (*б*)

В части боковых рам (около 50 %) в области источника или около него находятся литейные дефекты, которые, несомненно, повлияли на скорость развития усталостной трещины. Другую часть источников представляют очаги, сформированные по усталостному механизму без наличия макроскопического источника. Механические повреждения – достаточно редкая причина формирования трещины.

Все источники расположены у нижней поверхности внутреннего угла буксового проема, и большая их часть – с внутренней стороны тележки (рисунок 2.21, а), но никогда на боковой стенке. Малая часть источников располагается посередине нижней поверхности (рисунок 2.21, б) или на внешней стороне относительно тележки.

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.

Кроме того, сечения изломов имеют различную и сильно переменную толщину стенок от 12 до 40 мм (без учета литейных поверхностных и внутренних дефектов). В большей части изломов в разных частях у поверхности и внутри металла находились литейные дефекты – раковины, пористости, отдельные поры, ликвации и т. д. Литейные дефекты не имеют четко выраженных зон концентрации. Общая площадь литейных неоднородностей в изломе занимает до 5 % и хотя носит ослабляющий сечение характер, в большинстве случаев незначительно ослабляет его, так как при изгибных нагрузках в буксовом проеме литейные неоднородности в верхней части фактически не влияют на напряжения в нижней – рабочей части.

Все разрушения боковых рам происходят при различном накопленном километраже пробега, и явной связи с пробегом момента разрушения не прослеживается.

Подводя итоги анализа изломов литых деталей, можно сказать, что усталостный механизм роста при макроскопическом или микроскопическом источнике приводит к разрушению с момента формирования магистральной трещины в

течение различных интервалов времени, что, по всей видимости, связано с условиями эксплуатации и вероятностным характером распределения литейных неоднородностей в наиболее нагруженных участках. Максимально опасным участком являются внутренние углы буксового проема боковой рамы, на долю которых приходится около 95 % разрушений.

Все изломы носят усталостный характер с четко различимыми стадиями усталостной деградации структурного состояния, т. е. принципиально могут быть обнаружены методами НК. Следует отметить, что при наличии ползуна в межремонтный период укладывается около  $5 \cdot 10^7$  циклов нагружения в виде ударных импульсов. Поэтому можно считать, что развитие трещин в литых деталях и особенно в неподрессоренной боковой раме, может происходить как по малоцикло-вому, так и по многоцикло-вому сценарию.

### **Выводы по второй главе**

Расчетные и экспериментальные исследования напряженного состояния боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов показывают, что реальные нагрузки на детали в процессе эксплуатации существенно зависят от режимов эксплуатации и состояния тележки. Учитывая, что разрушение боковых рам происходит практически всегда во внутреннем углу буксового проема, можно уверенно говорить о вкладе сложного нагруженного состояния деталей на развитие усталостных трещин. Другим важным выводом анализа напряженного состояния боковых рам является существенное увеличение напряженного состояния во внутреннем углу буксового проема при появлении дополнительной нагрузки на деталь в виде ударов колеса в месте нахождения ползунов или выщербин колес, а также аналогичных дефектов рельсов. При комплексной нагрузке на боковую ра-

му, включающей удары на приведенных дефектах колес, напряжения во внутреннем углу возрастают до значений, которые превышают предел выносливости металла.

Таким образом, даже бездефектные детали в предельных реальных состояниях эксплуатации имеют напряжения, превышающие предел выносливости, а потому являющиеся потенциально опасными с точки зрения развития усталостных трещин.

Последующий анализ разрушений боковых рам и надрессорных балок показал, что боковые рамы, как неподдрессоренный элемент, разрушаются гораздо чаще и разрушаются именно на участке максимального комплексного напряжения на деталь. Кроме того, на скорость развития усталостных трещин во внутреннем углу буксового проема действует дополнительный негативный фактор – это место обладает повышенной вероятностью образования различных литейных дефектов, которые присутствуют в большинстве изломов боковых рам.

Наличие этих двух факторов (жесткость циклических нагрузок и наличие литейных дефектов в наиболее нагруженном сечении) является ключевым фактором, определяющим разрушение боковых рам. Подтверждением этому служит аналогичный анализ напряжений и изломов надрессорных балок, которые значительно меньше (на два порядка) и которые в аналогичных эксплуатационных условиях воспринимают нагрузки через пружинный комплект. Меньшее влияние оказывает и второй фактор – в зонах наиболее нагруженных (кромки технологических отверстий, опорная поверхность подпятника), в силу физических особенностей формирования твердого сплава при литье в таких зонах, имеют существенно меньшее число литейных дефектов – дополнительного неблагоприятного фактора, оказывающего влияние на формирование и рост усталостных трещин.

Статистический анализ обнаруживаемых дефектов в литых деталях показывает, что и вероятность появления, и скорость развития усталостных трещин в разных участках различная, при этом наибольшая она во внутреннем углу буксового проема в боковых рамах, наклонных плоскостях и опорной поверхности подпятника надрессорной балки. Это подтверждает данные анализа напряжений в

деталях. Кроме того, статистическая обработка позволила выявить интересную особенность – часть дефектов, современными средствами электромагнитной дефектоскопии идентифицируемых как трещины, с вероятностной точки зрения развивающимися усталостными трещинами не являются.

Учитывая высокий коэффициент перебраковки деталей (бракуется 3...8 % боковых рам и надрессорных балок) с сильной неравномерностью показателей отбраковки по разным предприятиям, можно признать, что электромагнитные методы с трудом справляются с задачей идентификации развивающихся трещин. Это обстоятельство требует широкого применения метода неразрушающего контроля, который наиболее пригоден для идентификации опасных усталостных трещин в боковых рамах и надрессорных балках. Одним из оптимальных методов по технико-экономическим соображениям, несмотря на большое число помех, является метод АЭ: за последние годы существенно улучшилось качество аппаратуры и способы обработки информации.

Поэтому дальнейшие исследования будут посвящены методологическим аспектам развития АЭ метода и его применения для контроля литых деталей сложной формы, таких как боковая рама и надрессорная балка грузового вагона.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЯХ

### 3.1. Постановка задачи совершенствования системы контроля литых деталей за счет внедрения АЭ метода

Литые детали тележки грузовых вагонов являются сложными объектами для разработки методов неразрушающего контроля их технического состояния. Специфика контроля таких деталей состоит в высокой неоднородности физико-механических свойств, сложности конструкции и неравномерности напряжений, испытываемых в процессе эксплуатации. Эти обстоятельства требуют построения последовательной системы контроля технического состояния, успешно решающей задачу обнаружения недопустимых развивающихся дефектов с низкой вероятностью ошибки как в сторону ошибочной браковки, так и в сторону ошибочного пропуска. Кроме того, неравномерное напряженное состояние сильно перераспределяются при возникновении естественных в процессе эксплуатации дополнительных факторов нагружения, таких как:

- продольные нагрузки типа ускорения, торможения или движения по продольно наклонному пути;
- боковые нагрузки, возникающие в кривых, которые могут усилиться неправильно закрепленным грузом;
- нагрузки кручения тележки, которые возникают в процессе эксплуатации вследствие неисправностей как тележки, так и пути.

Все перечисленные факторы существенно усложняют задачу контроля и требуют комплексного решения проблемы диагностирования таких деталей, как боковая рама и надрессорная балка грузового вагона.

Статистические исследования распределения усталостных трещин в зависимости от длины и момента времени их обнаружения от начала эксплуатации показали, что на разных участках литых деталей тележки различная вероятность образования значительных производственных дефектов, влияющих на эксплуатационную долговечность. При этом накопление усталостных повреждений также связано с сильной анизотропией физико-механических свойств, которая в разных зонах сильно отличается. Очевидно, что в процессе попыток совершенствования производства литых деталей эти распределения будут также меняться, и в связи с этим важным фактором становится достаточно универсальная и гибкая программа обследования боковых рам и надрессорных балок, максимально достоверно определяющая техническое состояние литых деталей тележки и способная прогнозировать состояние детали на максимальное время в межремонтном времени эксплуатации.

Учитывая то обстоятельство, что скорость роста усталостных трещин на наиболее нагруженных участках может привести к разрушению до момента последующей диагностики, следует признать, что для наиболее опасных участков необходимо применять один или несколько методов надежно обнаруживающих развивающиеся дефекты. Поэтому система неразрушающего контроля литых деталей должна содержать методы, с помощью которых можно не только обнаруживать несплошности, но и оценивать их склонность к деградации структурного состояния в виде пластического деформирования и образования и развития усталостных трещин и т.п.

Литые детали содержат достаточно большое количество внутренних литейных дефектов. Чаще всего эти дефекты являются опасными только при ослаблении того сечения, в котором они находятся, и перераспределении напряжений в их окрестности при эксплуатации вагонов. Это подтверждается при анализе приведенных на рисунках 2.21–2.24 изломов. Наличие внутренних литейных дефектов в боковых рамах и надрессорных балках предусмотрено в том числе нормативной документацией, где основным условием их допустимости является ограниченная площадь в сечении выбранных для разрезки деталей. Это является обя-

зательной частью применяемого разрушающего контроля на заводах-изготовителях. Опытные разрезы деталей по диагонали во внутреннем углу буксового проема показывают в более 70 % случаев наличие литейных раковин и ликваций в местах утолщения деталей (рисунок 3.1).

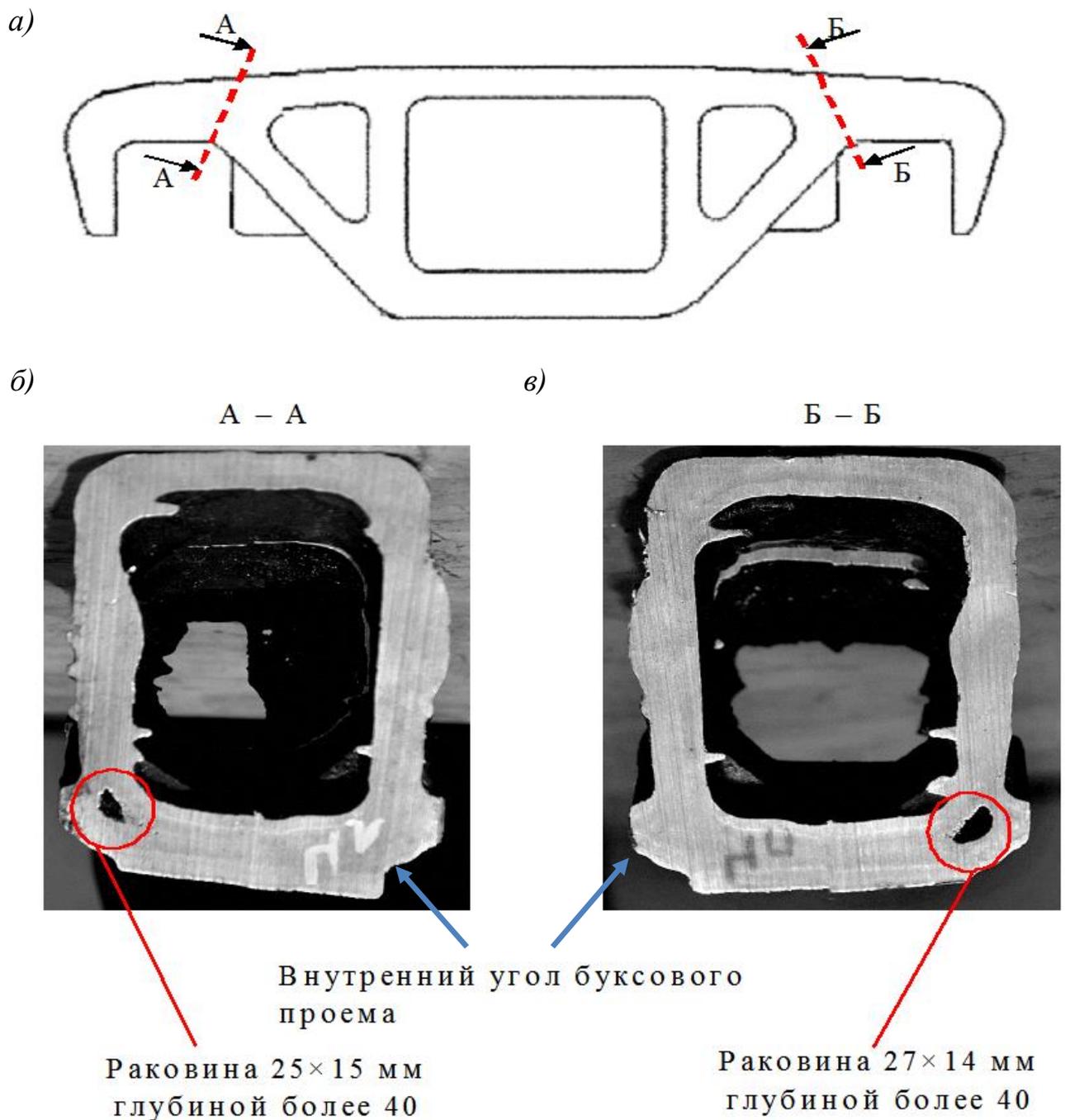


Рисунок 3.1 – Вид разреза боковой рамы при заводских испытаниях

Вторую задачу можно решить с помощью АЭ метода. Более того, в настоящее время этот метод является самым эффективным и методически проработан-

ным при обнаружении участков локальной и объемной необратимой перестройки структуры в виде пластического деформирования или развития усталостных трещин. Как показал анализ научно-исследовательских работ в первой главе, метод АЭ обладает большим числом первичных и производных параметров, сложным образом связанных со структурным и напряженно-деформированным состоянием объекта в целом и его отдельных локальных участков в частности.

Для успешного использования АЭ метода, во-первых, необходимо научиться идентифицировать те дефекты, которые необходимо распознавать. Если рассмотреть все возможные варианты развивающихся и излучающих АЭ дефектов, то можно выделить то что дефекты могут быть как локальные (например, усталостные трещины, зоны пластической деформации, зарождение трещин на крупных скрытых литейных неоднородностях), так и распределенные в объеме (например, упругая деформация, разрушение дефектных структур после ремонта направкой с нарушением технологии). Часть этих дефектов, такие как участки пластической деформации [24, 25] или развивающиеся трещины [204] имеют явно выраженные стадии, и для каждой из них будет свой механизм развития со своими отличными закономерностями. В любом случае для вязкого материала по [205] основными критериями являются – деформационные и энергетические. А значит энергетические показатели АЭ (например, суммарная энергия сигналов АЭ) как продукт разрушения должен коррелировать с параметрами развития перечисленных типов дефектов.

Во вторых, требуется определить уровни чувствительности АЭ в низкоуглеродистых и низколегированных сталях, которые позволят при разных напряжениях в различных участках оценить стадию развития дефекта.

В-третьих, следует определить, насколько возможно регистрировать АЭ на стадии упругой деформации в литой стали на стадии превышения предела выносливости, так как в этом случае уже возможно появления участков образования трещин. Следует учитывать, что состояние детали необходимо оценивать в условиях ремонтного предприятия с ограниченным количеством приемных преобразователей.

Учитывая, что материал литых деталей близок к вязкому и разрушение усталостных трещин на стадии стационарного развития, АЭ на этой стадии должна иметь признаки, присущие, главным образом, АЭ пластической деформации. Поэтому другой важный вопрос, который необходимо разрешить, можно сформулировать следующим образом – чем отличается АЭ на стадии пластической деформации, можно ли выделить стадии пластического деформирования. Кроме того, важно и то, насколько можно разделить пластическую деформацию материала в области объемного деформирования и в области стационарного развития усталостной трещины.

Другим ключевым аспектом проблемы является оценка возможности качественного АЭ контроля области отремонтированных наплавкой и сваркой пригодных для ремонта участков, так как еще в работе [206] указано на высокий процент образования усталостных трещин на участках заварки литейных дефектов. Ответы на предлагаемые вопросы позволят корректно выбрать основные параметры контроля, включая оптимальное количество приемных преобразователей и схему их расположения относительно наиболее подверженных дефектообразованию участков контроля, а это в первую очередь внутренний угол буксового проема боковых рам и средняя часть надрессорной балки. Более того, для контроля литых деталей тележки грузового вагона необходимо разработать дифференцированную модель оценки их технического состояния.

С учетом уровня развития современной АЭ техники следует признать, что особенности дифференцированной модели обработки АЭ информации заключаются в следующих принципах:

- все сигналы АЭ в зависимости от энергетических параметров (амплитуды, мощности, собственно энергии) можно разделить на высокоэнергетичные, которые регистрируются тремя или большим количеством преобразователей АЭ (рисунок 3.2), пограничные – которые имеют еще достаточно большие энергетические параметры, но для которых координаты определяются с повышенной погрешностью (рисунок 3.3) и низкоэнергетичные – уверенно зарегистрированные только одним преобразователем;

- для реализации такого подхода следует предложить систему автоматизированного учета чувствительности каналов;
- оценку состояния каждого участка детали следует проводить по трехуровневому принципу, для каждого из предлагаемых типов зарегистрированных сигналов;



Рисунок 3.2 – Акт АЭ из зоны деформации в детали, зарегистрированный тремя датчиками, амплитуды выше порога срабатывания системы более чем на 20 дБ

- в связи с большим уровнем ложных сигналов целесообразно разработать алгоритмы выделения часто встречающихся помех и распознавания «нетипичных» сигналов, под которыми следует понимать зарегистрированные сигналы, один или несколько параметров которых не попадают в диапазон значений, характерных для АЭ материала;
- разработка эмпирических моделей определения параметров ресурса литых деталей тележки и их опробование на реальных деталях.

Другим важным аспектом качественной АЭ диагностики деталей с переменными и неравномерно распределенными параметрами напряженного состояния является выбор типа и характеристик нагружения. Поэтому при исследованиях АЭ следует учесть влияние истории нагружения деталей и применение схемы нагружения, способной регистрировать и обрабатывать АЭ дефектных структур материала современным оборудованием. Кроме того, следует проанализировать принципиально влияние изменения числа циклов нагружения во время АЭ испытаний на достоверность получаемых результатов.

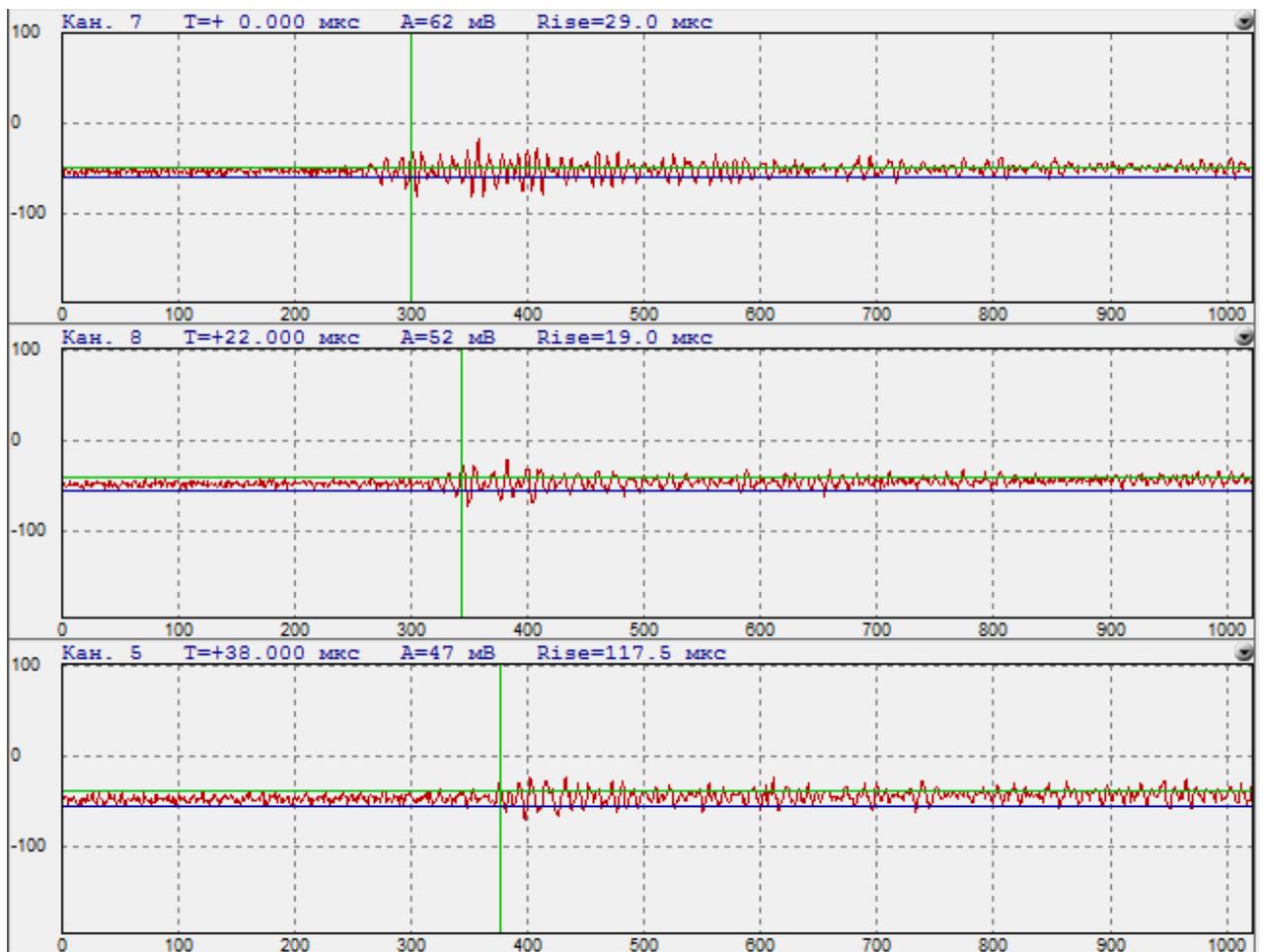


Рисунок 3.3 – Акт АЭ из зоны деформации в детали, зарегистрированный тремя датчиками, амплитуды выше порога срабатывания системы менее чем на 6 дБ

Как известно из многочисленных исследований, проведенных как на образцах, так и на изделиях и конструкциях (наиболее объемные данные приведены в работах [2–5, 15, 207, 208]) процесс АЭ характеризуется существенным изменением ос-

новых измеряемых параметров АЭ на разных стадиях развития дефектных структур, таких как трещины, пластические деформации и т. д. Естественно, что изменения этих параметров сильно зависят от реализованных характеристик записывающей аппаратуры и чувствительности каналов АЭ систем.

При реализации метода на реальном объекте на первом этапе важно вообще определить тип источника, так как причиной АЭ могут быть самые различные процессы, протекающие в объекте, например, представленные на рисунке 3.4.

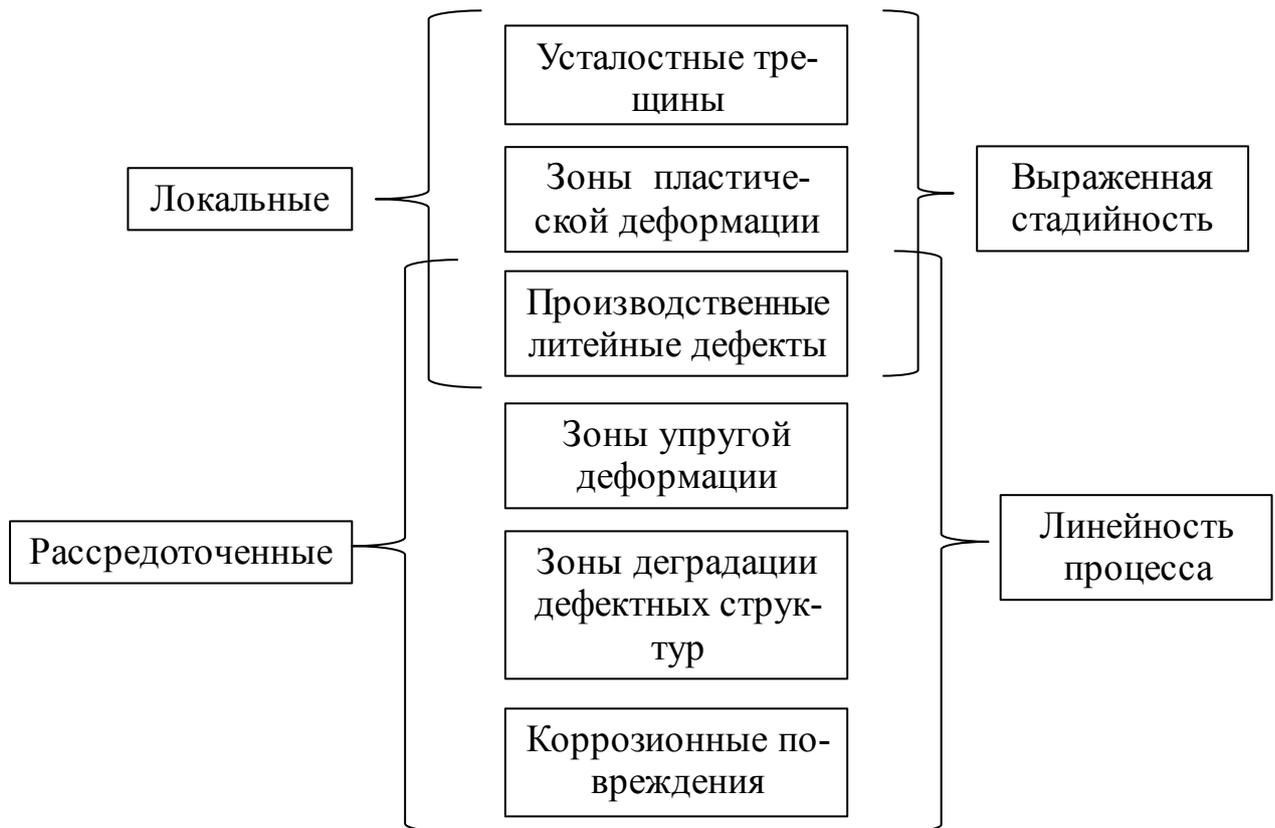


Рисунок 3.4 – Классификация потенциально опасных источников АЭ

Кроме того, исходя из основных известных исследований, каждый многостадийный процесс необратимого изменения структурного состояния (из представленных на рисунке 3.4) можно представить как состоящий из нескольких самостоятельных процессов. При этом в каждом случае АЭ является результатом энергетических потерь, связанных с эволюцией деформируемой системы [209, 210].

Поэтому важной практической задачей является определение типа источника по параметрам АЭ и их связи с условиями и характеристиками нагружения.

Современные системы АЭ [211, 212] контроля позволяют определить большое число первичных параметров и соответственно вычислить производные, которые могут быть показательными при оценке тех или иных необратимых структурных изменений.

### **3.2. Моделирование актов акустической эмиссии деформируемого материала и их параметров**

На первом этапе рассмотрим возможные варианты формирования упругих волн в материале вследствие высвобождения энергии в локальном участке. Следует оговорить, что рассмотрены будут источники формирования упругих волн при высвобождении энергии на макро- и мезоуровне. Такие акты необратимых изменений способна зафиксировать современная аппаратура АЭ в производственных условиях. Кроме того, именно эти изменения явно влияют на эксплуатационные характеристики объектов контроля.

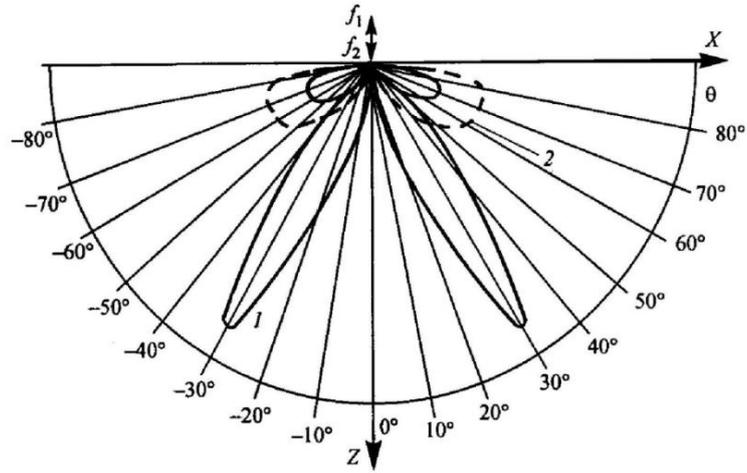
Прежде всего сразу следует разделить источники на поверхностные и внутренние, причем акты АЭ, происходящие в вершине развивающейся трещины, отнесем к внутренним источникам. Тогда все внутренние источники с точки зрения контроля являются потенциально опасными и требуют внимания исследователя. В то же время часть (а в реальности, на основании экспериментальных данных, подавляющее большинство) поверхностных источников является результатом различных поверхностных взаимодействий материала. Такие источники можно разделить на три типа:

- наплывы и выпуклые неровности основного металла или участков отремонтированных сваркой или наплавкой, деформируемые сжимающей нагрузкой в местах контакта с нагружающим устройством;
- участки, на которых при деформации выкрашивается окалина, элементы шлака, краски, хрупких посторонних материалов, происходят растрескивания хрупких частиц грязи на детали, попадающей в результате неаккуратной загрузки, выгрузки или перевозки этих материалов;
- участки трения детали или образца при нагружении в местах контакта с нагружающим устройством или другими деталями, не демонтированными перед проведением контроля.

Теоретические аспекты возникающих упругих волн в ходе действия различных сил в объеме и на поверхности объекта диагностики подробно рассмотрены в работе [213], где выведены формулы углового распределения упругих волн, излучаемых различными типами источников, и приведены диаграммы углового распределения амплитуд рассмотренных источников (рисунок 3.5).

Можно отметить, что источники второго и третьего типа, находящиеся на поверхности, испытывают воздействия нормальных к поверхности сил. Поверхностные источники первого типа испытывают комбинированное воздействие обоих типов, так как при вдавливании металла или даже инородного тела в материал под давлением в локальной области в окрестностях вдавливаемого материала происходят как процессы нормального деформирования, так и процессы тангенциального сдвига локальных участков относительно друг друга. При внутренних процессах в металле направленность поля излучения источника зависит в первую очередь от направления развития дефекта. Предполагается, что усталостные дефекты стремятся развиваться нормально к поверхности, следовательно, пара сил, прикладываемая к ним, направлена параллельно поверхности материала. В боковых рамах и надрессорных балках кроме неоднородного литого металла содержатся участки, отремонтированные сваркой, что может влиять на направление развития трещин под внешним воздействием.

а)



б)

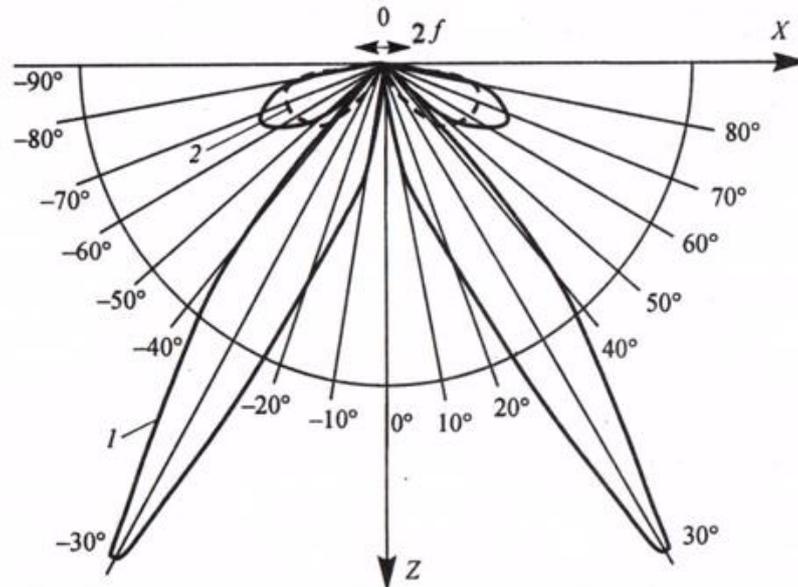


Рисунок 3.5 – Качественный вид диаграммы направленности поперечных (1) и продольных (2) волн, излучаемых парой сил в полупространство при нормальном воздействии (а) и при тангенциальном (б) действии [213]

Как видно из диаграмм, представленных на рисунке 3.5, любой из предложенных вариантов формирует продольные и поперечные волны, а значит, в волноводе (материале) контролируемого объекта, ограниченного хотя бы в одном направлении, возникает комбинация из нескольких колебаний как продольной, так и поперечной волны. При регистрации преобразователем она представляет собой протяженный сигнал, состоящий из наложений отдельных импульсов разной направленности, переотраженных от стенок объекта. Такое представление о

формировании сигнала АЭ на приемном преобразователе можно представить только при условии, что и источник, и приемник точечные:

$$u(t) = \sum_{i=0}^n U_i(\theta) e^{-r_i} f(r_i), \quad (3.1)$$

где  $u(t)$  – функция, описывающая волновой пакет изменения амплитуды регистрируемого сигнала АЭ от времени;  $U_i(\theta)$  – амплитуда сигнала АЭ в направлении преобразователя под углом  $\theta$  относительно направления релаксации напряжений согласно формулам, выведенным в работе [213];  $\alpha$  – коэффициент затухания того типа волны, который вносит вклад в волновой пакет;  $r_i$  – полное расстояние, пройденное волной от источника до приемника с учетом переотражений от стенок объекта диагностики;  $i$  – количество переотражений волны от стенок объекта на пути от источника до приемника;  $f(r_i)$  – функция деформирования волнового пакета каждого  $i$ -го импульса.

Приведенная формула описывает изменение амплитуды неискаженного сигнала АЭ, дошедшего до точки материала, соприкасающегося с преобразователем, так как переменная по частоте функция прямого пьезоэлектрического преобразования и амплитудно-частотная характеристика приемного преобразователя существенно исказят волновой пакет записанного и наблюдаемого исследователем сигнала. Для представления реального сигнала, дошедшего до преобразователя, следует учесть что источник представляет собой поверхность, так же как и поверхность приемного преобразователя. С учетом этого амплитуда сигнала представляет двойной интеграл по площадям этих поверхностей функции амплитуды каждой точки соприкосновения поверхности приемного преобразователя с объектом  $u(t)$ :

$$U(t) = \int_{S_F} \int_{S_n} u(t) dS_F dS_n, \quad (3.2)$$

где  $S_F$  – площадь поверхности отрыва источника;  $S_n$  – площадь приемного преобразователя.

Кроме того, следует учитывать, что на поверхности при формировании источников как нормальных, так и тангенциальных сил образуются поверхностные волны Рэлея.

Теперь рассмотрим поведение различных вариантов предложенных источников АЭ. При расчете положим, что подавляющее большинство реальных объектов имеет плоскую форму толщиной  $h$  и бесконечно большую протяженность в двух других плоскостях. Тогда важное значение имеет расстояние от источника до приемника, стоящего на поверхности плоского объекта. За основу расчетов приняты формулы для амплитудных акустических трактов, выведенных в работе [213]. Источники типа поперечных развивающихся трещин глубиной  $l$  (по рисунку 3.1, б) будут излучать продольную волну в зависимости от угла отклонения относительно направления развития трещины амплитудой (с упрощением влияния затухания) в соответствии с формулой:

$$u_l(\theta) = \frac{f(\Delta S) h k_l}{4\pi\mu r} \cdot \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 \cdot \cos^2(\theta) e^{-\delta r}, \quad (3.3)$$

где  $f(\Delta S)$  – функция, зависящая от плотности сил и площади приращения трещины  $\Delta S$ ;  $\theta$  – угол отклонения продольной волны относительно направления развития трещины;  $r$  – расстояние, пройденное волной до приемника;  $h$  – приращения трещины;  $k_l$  – волновое число;  $\mu$  – постоянная Ляме;  $C_t$  и  $C_l$  – скорости поперечной и продольной волн,  $\delta$  – коэффициент затухания.

Однако также следует учитывать, что при использовании резонансного или полосового приемного преобразователя добавляется множитель  $\cos(\gamma)$ , причем если трещина приросла строго перпендикулярно поверхности, то  $\gamma = 0$ . Аналогичная формула может быть применена для поперечной волны [213] с учетом передачи преобразователю нормальной составляющей колебаний:

$$u_t(\theta) = \frac{f(\Delta S) h k_l}{4\pi\mu r} \cdot \sin(\theta) \cos^2(\theta) e^{-\delta r}. \quad (3.4)$$

Однако следует учитывать, что и продольная и поперечная волны в силу зависимости от угла  $\theta$  могут иметь максимальную амплитуду при одном из переотражений волны от стенок объекта диагностики при продвижении к приемнику, как это видно из рисунка 3.6.

Если же источником АЭ является пара вертикальных сил, т. е. источник – это горизонтальное расслоение, параллельное поверхности или отслоение на по-

верхности, то формула амплитудной диаграммы направленности продольной волны выглядит по [213] следующим образом:

$$u_l(\theta) = \frac{f(\Delta S) h k_l}{4\pi\mu r} \cdot \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^3 \times$$

$$\times \frac{\sin^2(\theta) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \left(1 - 2\left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2\right) \sqrt{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 \cdot \sin^2(\theta)}}{\left(2 \cdot \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 \cdot \sin^2(\theta) - 1\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^3 \cdot \sin^2(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 \cdot \sin^2(\theta)}} e^{-\delta r}, \quad (3.5)$$

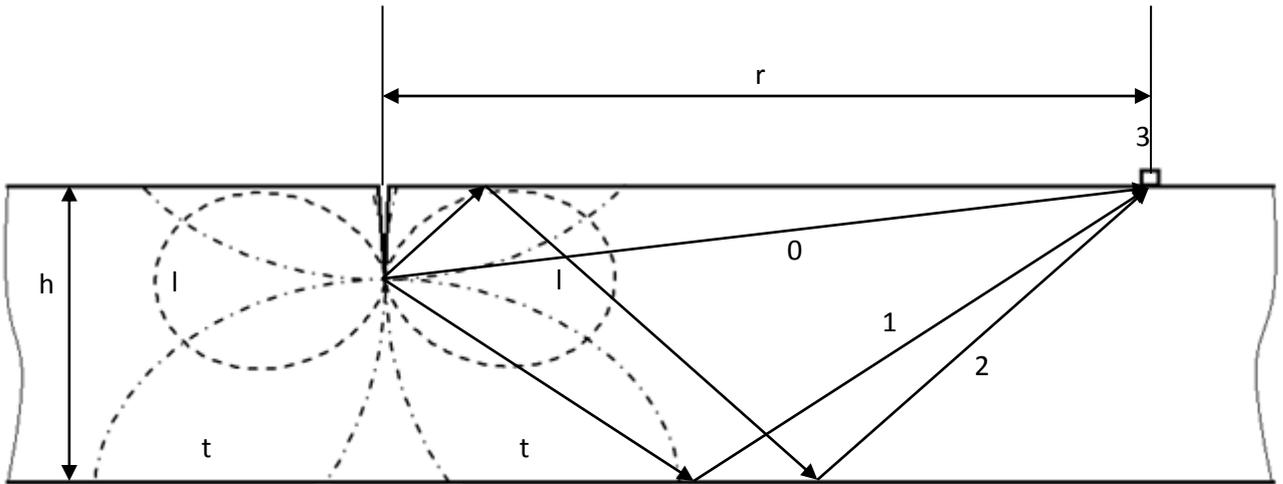


Рисунок 3.6 – Диаграмма направленности продольной *l* и поперечной *t* волн от приращения трещины в нормальном направлении и направления лучей прямого (0), однократно отраженного от стенки (1) и двукратно отраженного от стенок (2) объекта, достигших приемного преобразователя (3)

а для поперечной волны:

$$u_t(\theta) = \frac{f(\Delta S) h k_l}{4\pi\mu r} \cdot \frac{\sin(\theta) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \left(1 - 2\left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2\right) \cdot (2 \cdot \sin^2(\theta) - 1)}{(2 \cdot \sin^2(\theta) - 1)^2 + 4 \cdot \sin^2(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{\left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 - \sin^2(\theta)}} e^{-\delta r}. \quad (3.6)$$

Рассмотрим поведение функции  $f(S)$  для различных источников волн.

При растяжении и наличии разрывающей поперечной трещины вглубь напряжения в вершине трещины [214] можно описать в виде:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.7)$$

где  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений (КИН),  $r$  – расстояние от вершины трещины. КИН при растяжении [215]:

$$K_1 = (1,12 - 0,23\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30,39\lambda^4) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (3.8)$$

где  $\lambda$  – отношение длины трещины к толщине образца. Подставляя значения длин трещины нетрудно увидеть, что в близкой перспективе  $\sigma$  меняется слабо, за исключением интервалов нагрузок близких к критическим, что в нашем случае не является предметом решения.

Описание каждого отдельного элемента амплитуды  $u(t)$  как точечного источника от развивающейся вглубь трещины перпендикулярно поверхности для продольной волны, взяв за основу формулу (3.3) можно представить в виде:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \left[ u_i \cdot D_i \frac{f(\Delta S)}{r_i} \left( \frac{c_t}{c_l} \right)^2 \cdot \sin^2(\theta_i) e^{-\delta r_i} \right], \quad (3.9)$$

где  $u_i$  – уравнение описывающее колебательный процесс бегущей волны;  $D_i$  – коэффициент прохождения волны на границах объекта;  $i$  – натуральный ряд чисел.

Колебания генерируемые единичным волновым пакетом  $i$  в точке регистрации на приемнике, которая представляется на осциллографе аппаратуры можно описать в виде нормального распределения, смещенного по времени на величину:

$$t_i = t_n - \frac{r_i}{c_l} + 3\sigma, \quad (3.10)$$

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

Тогда  $u_i$  для продольной волны задается в виде нормально распределенного импульса ввиду дисперсии скорости ультразвуковой волны [216, 217] при прохождении анизотропной среды с поликристаллической структурой:

$$u_i = \frac{f(\Delta S) h k_l}{4\pi\mu r} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\left(t - \frac{r_i}{c_l}\right)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (3.11)$$

где  $\sigma$  – структурный коэффициент, представляющий собой квадратный корень из дисперсии скоростей ультразвуковой волны.

Кроме того, используя формулы 3.3-3.6 следует учитывать, что преобразователи в силу поляризации пьезоэлектрика способны воспринимать при преобразовании только нормальную составляющую колебаний, поэтому, например, формула 3.8 с учетом этой поправки будет выглядеть:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \left[ u_i \cdot \sin \theta_i \cdot D_i \frac{f(\Delta S)}{r_i} \left( \frac{c_t}{c_l} \right)^2 \cdot \sin^2(\theta_i) e^{-\delta r_i} \right]. \quad (3.12)$$

Пути от источника до приемника описываются из геометрически заданных параметров по рисунку 3.6 и они представляют сумму несущих параметров  $r_i$  и  $\theta_i$  подчиняющихся следующим последовательностям.

Для прямого луча на пути от источника до приемника:

$$r_0 = \sqrt{r^2 + h^2}; \theta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{h}{r} \right). \quad (3.13)$$

Для лучей имеющих нечетное количество отражений от стенок:

$$r_i = \sqrt{r^2 + (2iH - h)^2}; \theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{2iH - h}{r} \right). \quad (3.14)$$

Для лучей имеющих четное количество отражений от стенок:

$$r_i = \sqrt{r^2 + (2iH + h)^2}; \theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{2iH + h}{r} \right), \quad (3.15)$$

Через аналогичные параметры можно выразить  $u_i$  для поперечных волн:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \left[ u_i \cdot D_i \frac{f(\Delta S)}{r_i} \sin(\theta_i) \cos^2(\theta_i) e^{-\delta r_i} \right]. \quad (3.16)$$

Таким образом, сложив значения для продольной и поперечной волн получаем волновой пакет для сигнала в точке. Прямое интегрирование такой сложной формулы невозможно, но возможно численное решение задачи.

При развитии дефекта вглубь и значения амплитуды волны по формулам 3.8 и 3.14 возрастает с увеличением скорости роста трещины, а при пластической деформации некоего объема напряжения в сечении растет не так очевидно. Это различие позволяет проанализировать поведение сигнала при развитии трещины.

В любом из рассмотренных случаев на границах раздела при отражениях волны или прохождении к преобразователю для анализа предлагаемой модели следует учитывать коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $D$  в зависимости от импеданса контактирующих с контролируемым материалом сред.

При расчетах пренебрежем коэффициентом преобразования на границе сред металл-преобразователь и функцией описывающей амплитудно-частотную характеристику преобразователя. Тогда вид волнового пакета сигнала в точке, отстоящей 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 нашем случае колеблется в диапазоне 10...30 мм) с учетом коэффициента затухания равным  $1 \text{ м}^{-1}$  и временем  $t_{\text{п}}=100$  мкс будет иметь вид, представленный на рисунке 3.7.

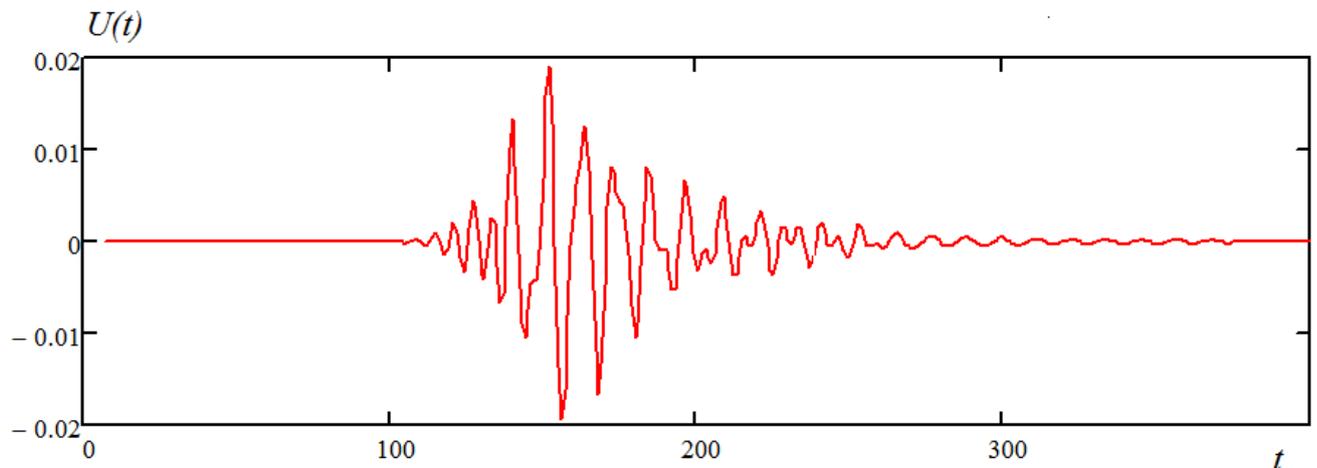


Рисунок 3.7 – Рассчитанный волновой пакет на приемнике сигнала с учетом акустического тракта волн от источника типа поперечной трещины глубиной 5 мм на расстоянии 150 мм

Теперь рассчитаем, насколько смещение источника может повлиять на максимальную амплитуду принимаемого сигнала АЭ приемником, находящимся от источника на расстоянии  $r$  по касательной к поверхности. Для расчета положим, что объект диагностики имеет толщину  $H=15$  мм и трещину варьируемой глубиной  $h$ . Так как потенциально источник может находиться на любом расстоянии  $r$  от приемника, зададим условно связь  $r = 1h; 3h; 10h; 50h$  – вполне реальные для геометрических размеров литых деталей подвижного состава, а также любых плоских конструкций. Учитывая, что волновой пакет импульса АЭ несет в себе все составляющие колебаний, в том числе переотраженные от стенок, то максимум амплитуды может быть у составляющей, отраженной от стенок несколько раз. Так, например, максимальная амплитуда на расстоянии  $r = 1h$  для продольной

волны приходит от однократно отраженной составляющей, а на расстоянии  $r = 50h$  от семикратно отраженной составляющей. Однако часть импульса, несущая поперечную волну, имеет большие амплитуды в сравнении с продольной волной, что видно из формул (3.3)–(3.6).

Анализ расчетных максимумов амплитуды показывает, что, если расстояние между источником типа поперечной трещины и приемником  $r < 5h$ , то погрешность изменения максимальной амплитуды при приращении трещины на  $h = 0,1h$ . В этом случае смещение координаты источника, может значительно изменяться в зависимости и от расстояния между источником и приемником, и от глубины источника, т. е. фактически его величины, что видно из рисунка 3.8.

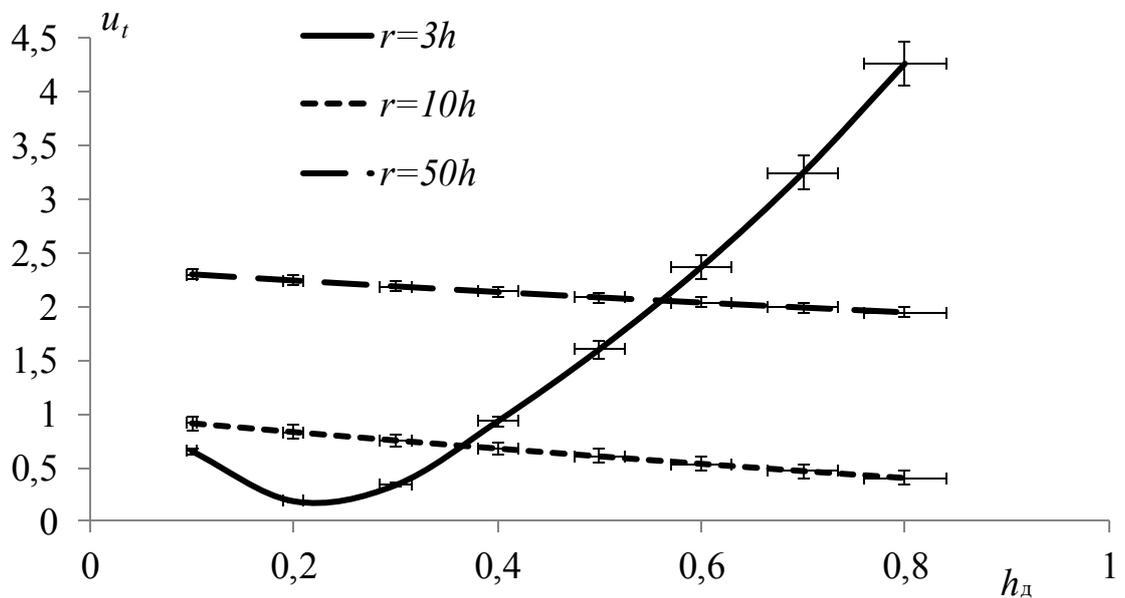


Рисунок 3.8 – Зависимость расчетного относительного изменения максимальной амплитуды сигнала АЭ от глубины залегания источника при его приращении на  $0,1h$  с учетом расстояния от источника до приемника

Теперь рассчитаем, насколько смещение источника может повлиять на максимальную амплитуду принимаемого сигнала АЭ приемником, находящимся от источника на расстоянии  $r$  по касательной к поверхности. Для расчета положим, что объект диагностики имеет толщину  $H=15$  мм и трещину варьируемой глубиной  $h$ . Так как потенциально источник может находиться на любом расстоянии  $r$  от приемника, зададим условно связь  $r = 1h; 3h; 10h; 50h$  – вполне реальные для геометрических размеров литых деталей подвижного состава, а также любых

плоских конструкций. Учитывая, что волновой пакет импульса АЭ несет в себе все составляющие колебаний, в том числе переотраженные от стенок, то максимум амплитуды может быть у составляющей, отраженной от стенок несколько раз. Так, например, максимальная амплитуда на расстоянии  $r = 1h$  для продольной волны приходит от однократно отраженной составляющей, а на расстоянии  $r = 50h$  от семикратно отраженной составляющей. Однако часть импульса, несущая поперечную волну, имеет большие амплитуды в сравнении с продольной волной, что видно из формул (3.3)–(3.6).

Варьируя параметры  $h$  и  $r$  можно увидеть не только качественные изменения волновых пакетов и произвести их количественную оценку.

Так, если источник излучает несколько сигналов АЭ, вызванных приращением трещины, то очевидно, что все они между собой будут иметь достаточно высокий коэффициент взаимной корреляции и этот параметр можно использовать для идентификации таких источников.

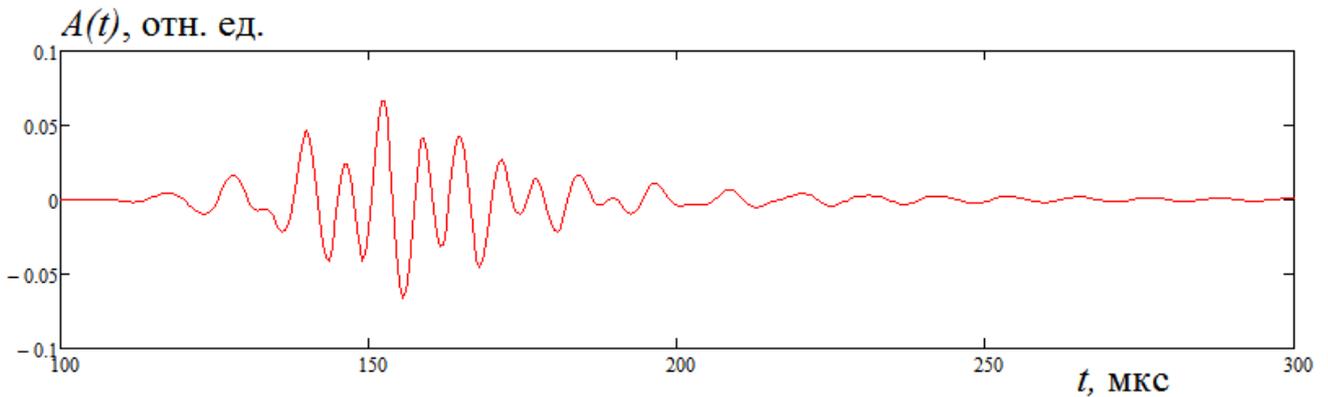
В дальнейшем в программе Mathcad анализировали коэффициенты взаимной корреляции рассчитанных сигналов в зависимости от приращения трещины (смещения источника) на величину  $r$ , изменения направления ее продвижения на угол  $\gamma$ . Так на рисунке 3.9 приведены рассчитанные сигналы с параметрами, аналогичными волновому пакету приведенному на рисунке 3.7. Один из сигналов инициирован источником находящимся на глубине 3 мм и расположенный нормально к плоскопараллельной поверхности, а другой на глубине 3,2 мм и находящийся под углом  $5^\circ$  к нормали.

Как видно из рисунка 3.9 расчетные волновые пакеты таких сигналов мало отличаются внешне, поэтому логично использовать параметр, описывающий степень похожести сигналов. Таким параметром может быть коэффициент взаимной корреляции сигналов. Учитывая дискретный характер информации об изменениях каждого сигнала АЭ определяемый по формуле:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (a_{1i} - \bar{a}_1) \cdot (a_{2i} - \bar{a}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{1i} - \bar{a}_1)^2 \cdot (a_{2i} - \bar{a}_2)^2}}, \quad (3.17)$$

где  $n$  – общее число дискретных значений оцифрованного сигнала (в нашем случае с частотой 2 МГц);  $a_{1i}$  и  $a_{2i}$  – значения амплитуды сигналов 1 и 2 в каждой точке дискретизации  $i$ , в относительных единицах;  $\bar{a}_1$  и  $\bar{a}_2$  – средние значения сигналов 1 и 2 соответственно.

а)



б)

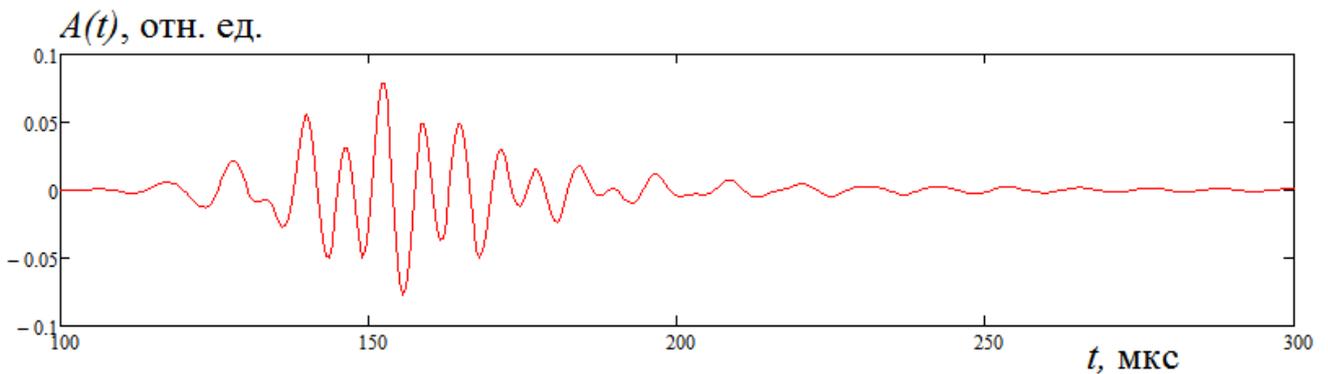


Рисунок 3.9 – Рассчитанные волновые пакеты сигналов, излученных с глубины  $h=3$  мм источником ориентированным нормально к поверхности (а) и источником с  $h=3,1$  мм и отклонившимся на  $5^\circ$  от нормали (б)

Расчет коэффициента взаимной корреляции сигналов с разной глубиной залегания при приращении на 2 мм и смене направления продвижения трещины на угол  $\gamma$  приведены на рисунке 3.10.

Полученные расчеты показывают, что развивающаяся трещина дает сигналы с коэффициентом корреляции выше 0,7 несмотря на удаление от источника, продвижения вглубь материала и изменения направления распространения на углы менее  $15^\circ$ . Кроме того, следует отметить, что на малых расстояниях между источником и приемником коэффициент корреляции, размах и амплитуда сигналов

ведут себя более нестабильно при изменениях координат и направления развития источника.

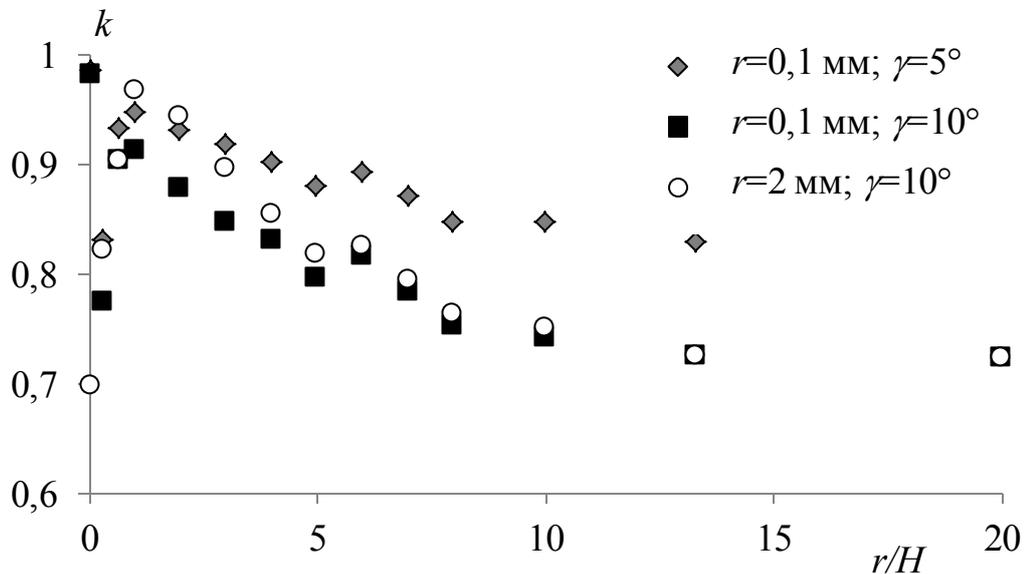


Рисунок 3.10 – Изменение коэффициента взаимной корреляции двух сигналов от источников, расстояние между которыми  $r$ , когда один из них ориентирован нормально к поверхности, а другой отклоняется на угол  $\gamma$  от нормали

Теперь рассмотрим случай, когда происходит горизонтальное расслоение, а угловое распределение излученной амплитуды объемных волн, с учетом того что приемник принимает только вертикальную составляющую колебаний, описано формулами (3.5) и (3.6). В этом случае вероятность того, что расслоение может произойти под другим расслоением чрезвычайно низка, если только это не хрупкие спеченные материалы, к которым низкоуглеродистые стали не относятся ни в каком структурном состоянии. Поэтому повторное расслоение может произойти в другом месте. При расчетах исходили из того, что расслоение в процессе нагружения имеет достаточно большую вероятность повторно произойти рядом с тем участком, на котором находится источник расслоения. Задавая значение смещения источника в виде расслоения на  $0,1h$ , получаем аналогичные изменения. Однако если учесть, что каждый новый источник вертикальных сил будет смещаться, то очевидно, что изменяется координата источника гораздо сильнее, по срав-

нению с поперечной трещиной, что приводит к увеличению отклонения амплитудных значений в два раза.

Исходя из анализа предложенной модели резкое изменение направления развития трещин или дополнительное образование микротрещин в разных направлениях должно приводить к резкому снижению коэффициента взаимной корреляции сигналов.

Расслоения, прирастающие от одного источника и в одном направлении, имеют достаточно высокий коэффициент корреляции – выше 0,6. Поэтому этот параметр можно использовать для идентификации любых развивающихся источников.

Исходя из представленных расчетов, получаем, что действия поперечных сил (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  $10^\circ$  или аналогичные искривления поверхности литой детали;

- наличие 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;

- в случае нахождения источника близко к приемнику значение коэффициента корреляции между разными актами может снижаться;

- следует учитывать, что на реальные зарегистрированные сигналы оказывает влияние частоты на изменение коэффициента преобразования, а также направленность колебаний, так как пьезоэлектрические преобразователи чувствительны только к нормальной составляющей колебаний, поэтому реальные записанные сигналы будут иметь сильно ослабленные колебания в тангенциальной плоскости.

Вместе с тем источник нормальных сил к поверхности (типа расслоения металла на определенной глубине) будет иметь два потенциальных источника АЭ на краях такого расслоения и участки трения берегов расслоения, поэтому сигналы будут обладать более низким коэффициентом взаимной корреляции.

Другим важным аспектом АЭ контроля является оценка масштаба происходящих в контролируемом объекте изменений, Традиционно масштаб изменений связывается с энергией, зафиксированной приемными преобразователями [1, 5, 213]. Данный метод обладает недостатками, которые существенно скрадываются при контроле объектов типа труб, сосудов, то есть условно плоских и с однородной структурой.

При контроле деталей сложной формы с достаточно толстыми стенками, толщина которых больше длины волны влияние диаграммы направленности, неоднородности структуры материала приводят к существенным искажениям связи энергии сигналов АЭ с масштабом изменений. Для повышения надежности оценки масштаба локальных изменений, вызванных каждым актом АЭ можно использовать влияние на затухание акустических колебаний в твердых телах их частоты. Как известно, длина волны формируется источником [5] и связана именно с величиной деформируемого слоя источником при единичном акте разрушении материала. Однако, при распространении волны существенное искажение на фиксируемые приемными преобразователями энергию и амплитуду накладывает затухание (рассеяние) которое связано с длиной волны, а значит и масштабом произошедших необратимых процессов.

Определить масштаб, хотя бы качественно, можно используя то обстоятельство, что разные преобразователи, как правило, находятся на разном расстоянии от источников АЭ. Тогда определение коэффициента затухания и первичной энергии (или амплитуды) сигналов при решении систем уравнений между парами преобразователей сообщает дополнительную информацию о масштабе разрушения и повышает точность оценки величины происходящих локальных изменений.

Кроме того, опираясь на проведенные расчеты для определения стабильности направленности источника можно использовать коэффициент корреляции

между максимумами амплитуд сигналов, принятых двумя ближайшими к источнику приемниками:

$$k_U = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{1i} - U_{1cp})(U_{2i} - U_{2cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{1i} - U_{1cp})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{2i} - U_{2cp})^2}} \quad (3.18)$$

где  $N$  – число сигналов от источника;  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$  – максимальная амплитуда  $i$ -того сигнала от источника принятого первым и вторым ближайшими к источнику приемниками соответственно;  $U_{1cp}$  и  $U_{2cp}$  – средняя максимальная амплитуда сигналов от источника принятого первым и вторым ближайшими к источнику приемниками соответственно.

Полученные результаты показывают, что процессы деградации структуры, имеющие принципиально одинаковые механизмы и близкие координаты порождают сигналы АЭ с более высоким коэффициентом взаимной корреляции по амплитудно-временному распределению. К таким источникам в первую очередь относятся развивающиеся трещины.

### **3.3. Некоторые аспекты изменений параметров акустической эмиссии при деформировании реального металлического объекта**

В монографии В.И. Иванова и И.Э. Власова [5], показано, что изменение параметров АЭ материалов тесно связаны с механическим состоянием материала. Однако большинство теорий, в которых проводится моделирование АЭ не учитываются обстоятельства вовлеченного в изменения объема (например, упругая-пластическая деформация).

В свете решаемых задач АЭ методом по оценке состояния объектов и их локальных участков существует потребность идентифицировать достаточно большой диапазон развивающихся под нагрузкой дефектов: магистральных трещин,

деформаций (и упругой и пластической), коррозионных повреждений, дефектных структур (например, видманшттет). Все эти дефекты ведут себя различно под нагрузкой, в том числе с точки излучения АЭ. При анализе результатов контроля исследователь имеет массив информации в виде не равно распределенной по времени и нагрузке последовательности сигналов с набором индивидуальных параметров, обработав который ему необходимо решить задачу распознавания типа дефекта и его опасности.

Наиболее используемыми в АЭ диагностике являются такие параметры, как активность  $\dot{N}$ , суммарный счет  $N_{\Sigma}$ , суммарная энергия  $E_{\Sigma}$  и их дифференциальные значения, определяемые в ходе испытаний [10]. Согласно [5, 221] считается, что суммарный счет АЭ развивающегося дефекта является степенной функцией от нагрузки или времени испытаний, что предполагает пропорциональность суммарного счета и активности импульсов АЭ со скоростью роста трещины:

$$N = At^n, \quad (3.19)$$

где  $A$  и  $n$  – коэффициенты материала.

У активно развивающегося источника коэффициент  $B$  изменяется в пределах от 1 до 6 и, когда  $B$  достигает критического значения 6, то испытываемый объект близок к разрушению. В целом степенная зависимость была подтверждена различными исследованиями на различных материалах [5, 34, 218].

Если параметр  $t$  в формуле (3.18) заменить на параметр характеризующий напряженно-деформированное состояние объекта –  $\frac{\sigma_i}{\sigma_B}$ , то его можно использовать применительно к состоянию каждого отдельного объекта и даже отдельного участка.

В работах В.В. Носова [34, 219-221] принципы анализа потоковой АЭ информации приводятся в качестве значимых потоковых параметров критерии степенного приращения в виде относительного коэффициента:

$$X_{АЭ} = \frac{d(\ln \xi)}{dt}, \quad (3.20)$$

где  $\xi$  – функция отражающая повреждаемость материала, пропорциональная концентрации микротрещин. В качестве параметра, отражающего  $\xi$  в работе [219] предлагается использовать активность или число импульсов АЭ, хотя изменение этих параметров при развитии дефектов не одинаково [2, 4, 5]. Формула (3.19) применялась В.В. Носовым при повышении нагрузки на объект и неприменима при отсутствии скорости роста нагрузки.

Другим параметром, отражающим относительную величину напряжений в локальной области, выведенным В. В. Носовым является коэффициент напряжений, определяемый по формуле:

$$F_{\text{АЭ}} = \frac{\ln(\xi_1)}{\ln(\xi_2)} = \frac{\ln(N_1)}{\ln(N_2)}, \quad (3.21)$$

где  $N_2$  – активность эталонного источника, с известным напряженным состоянием. Но при использовании формулы 3.18 и 3.19 происходит упрощение, так как:

$$N = N_0 \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_B} \right)^n \Rightarrow \log_n \left( \frac{N}{N_0} \right) = \frac{\sigma_i}{\sigma_B} \Rightarrow \log_n N - \log_n N_0 = \frac{\sigma_i}{\sigma_B} \Rightarrow$$

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_B} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{\ln n}. \quad (3.22)$$

В случае если параметры  $N_0$  и  $n$  являются константами формула 3.21 можно преобразовать как:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_B} = \frac{\ln N}{\ln n} - \frac{\ln N_0}{\ln n}, \quad (3.23)$$

и последнее вычитаемое не учитывать как незначимое при определении напряженного состояния материала, что и сделано в работах [219-221].

Однако и число импульсов, и активность в объекте существенно зависят механизмов деформирования и как показано в работах [2, 5] слабо коррелируют с напряжением, даже в локальной области деформирования. Это происходит из-за включения разных механизмов процессов деградации структуры в отдельных участках, излучающих сигналы АЭ.

Между тем, современная техника позволяет быстро вычислять энергию сигналов АЭ, которая как показано в [5, 34] пропорциональна квадрату напряжений в области развивающейся трещины и следовательно квадрату напряжений [5]:

$$E_{аэ} \approx E_y = \frac{\sigma^2}{2E},$$

где  $E_y$  – упругая энергия, выделяемая актом приращения трещины;  $\sigma$  – напряжение при котором произошел акт высвобождения упругой энергии;  $E$  – модуль упругости. Следует отметить, что такой макроскопический подход к исследованию энергии АЭ приводит к большим с теоретической точки зрения значениям энергии. Но, как показывают и практический опыт [5, 222] реально фиксируемая энергия сигналов АЭ значительно меньше, что говорит о том, что АЭ методом фиксируются микроскопические процессы, связанные с необратимыми изменениями в локальных объемах. Кроме того что напряжение  $\sigma$  растет в вершине трещины, как известно [223, 224] оно растет не в точке, а в области, прилегающей к вершине и расширяет эту область повышенных напряжений, а значит повышается вероятность формирования сигналов не только из вершины, но из ее окрестностей. Это обстоятельство требует исследований поведения  $E_{АЭ}$ .

С практической точки зрения распознавания типов источников и их характеристик следует признать, что даже при статической деформации гладких образцов без концентраторов в упругой и пластической стадиях задействованы разные объемы материала и активизируются различные процессы дегградации структуры, а на пластической стадии выделяются этапы с различным вкладом разных механизмов ее развития. Очевидно, что на этих различных стадиях и количество источников и их активность и энергия АЭ может быть различна, хотя бы вследствие различий механизмов высвобождения энергии при их протекании.

В реальных условиях контроля АЭ методом для литых объектов контроля стоит задача идентификации нескольких типов дефектов: деформации на разных стадиях, разрушение дефектных структур (например, видманштеттовой структуры, флокены и т.п.), формирование или развитие трещины [15].

Более того, следует учитывать, что параметры АЭ дискретны. и связаны с развитием конкретных локальных неоднородностей, т. е. при конкретном векторе развития дефектного участка под нагрузкой носят во многом случайных характер. Следовательно, их адекватная оценка должна носить элементы статистического анализа.

Рассматривать поток сигналов АЭ как вероятностный процесс, предлагали С.И. Буйло [13, 31], И.М. Романишин [170] и другие. Тогда распределение сигналов следует оценивать с помощью статистического аппарата как дискретное распределение событий. Однако дискретные распределения оперируют независимыми событиями. В случае потока сигналов АЭ отдельные сигналы являются независимыми событиями частично и только на стадии упругого деформирования и формирования развивающихся макродефектов. Как только деградационные процессы локализуются – нарушается принцип независимости событий. Это может выражаться в виде изменения относительного числа сигналов из локальной области (например, с наибольшим числом зарегистрированных сигналов) приведенному к среднему уровню сигналов их всех локальных областей. Чем больше будет различие между этими параметрами, тем вероятнее наличие развивающегося источника, однако в этом случае следует учитывать и напряженное состояние неравномерно нагруженной детали.

Следует признать, что для объектов сложной формы и испытывающих различные условия, периодичность и силы приложения нагрузки на основании проведенных во второй главе исследований при испытаниях однократным нагружением изгибом в любом направлении мы можем не достигнуть эффекта превышения нагрузки испытаний над рабочими нагрузками. Поэтому необходимо исследовать возможности применения АЭ метода при нагрузках, не превышающих эксплуатационные и возможности повторного нагружения в процессе АЭ контроля.

Если в объекте напряжения распределяются равномерно (например, одноосное растяжение образца и изотропной структурой), то следует процессы и параметры АЭ в упругой области приводить к единице локального объема для того,

чтобы эти результаты можно было сравнивать с параметрами полученными в пластической области, происходящими как раз в локальном объеме. Проблема такого подхода заключается в постоянном изменении локального деформируемого объема при приближении к разрушению образца.

Однако, чаще всего в сложных конструктивно изделиях и конструкциях напряженное состояние сильно неравномерно. В этом случае достаточно контролировать состояние наиболее нагруженных участков. Но для литых деталей задача усложняется ввиду изменения схем нагрузки в процессе эксплуатации, а следовательно, спектр контролируемых участков увеличивается. Поэтому важной характеристикой, описывающей состояние дефекта, будет являться график изменения концентрации источника в зависимости от величины приложенной нагрузки при испытаниях. Концентрация источника может характеризоваться числом сигналов в минимальной площади, с которой получены сигналы АЭ от источника, для которых определены координаты.

Использовать для оценки состояния материала в качестве потокового параметра целесообразно энергию сигналов АЭ, так как энергия, выделившаяся в виде упругих колебаний при развитии дефекта зависит, во многом, от структурного состояния в области разрушений и концентрации напряжений в вершине трещины (при ее наличии) или пластического деформирования. И энергия отдельных сигналов АЭ фактически никак не связана между собой и представляет независимые события.

Поэтому для анализа состояния каждой локальной области объекта целесообразно использовать энергию или приращение энергии сигналов АЭ в соответствии с формулами:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_B} = \frac{\ln \frac{E}{E_0}}{\ln n}, \quad (3.24)$$

для области упругой и пластической деформации и

$$K = \frac{\ln \frac{E}{E_0}}{\ln n}, \quad (3.25)$$

для развивающейся трещины, где  $K$  – КИН.

Для каждого отдельного сигнала его энергию будем определять по формуле, предложенной в [5]:

$$E = \int_{t_0}^{t_k} u(t)^2 dt, \quad (3.26)$$

где  $u$  – функция колебаний, полученная Фурье-преобразованием волнового пакета сигнала;  $t_0$ ,  $t_k$  – соответственно время начала и время окончания колебаний сигнала, зарегистрированные АЭ системой.

Использование параметров степенной зависимости  $E_0$  и  $n$  в случае развития деградационных процессов на повреждённом участке может в интервале нагрузок требует их анализа также со статистической точки зрения. Эти параметры явно зависят от структурного состояния материала, которое (особенно у отливок) может существенно меняться по глубине. Это значит, что и параметры  $E_0$  и  $n$  зависят от скорости нагружения, величины зерна, характера разрушения и т.п. Что требует дополнительного исследования для литых деталей сложной формы.

В связи с вышесказанным при АЭ испытаниях формулы (3.23) и (3.24) позволяет на любом интервале изменения нагрузки определить оба параметра  $E_0$  и  $n$  при наличии АЭ данных. Очевидно, что чем более будет этот интервал времени, тем точнее будет АЭ информация отражать состояние материала в области развития источника.

Приведенные рассуждения показывают, что такие параметры как число сигналов АЭ или их активность не могут поддаваться устойчивой связи с характеристиками напряженно-деформированного состояния. Однако полностью исключать эти параметры из рассмотрения не следует, так как большое число сигналов из локальной области говорит, как минимум, о надежности получаемой информации о наличии необратимого процесса. Поэтому число сигналов можно с одной стороны, использовать как критерий надежности используемых для оценки параметров. Чем выше число сигналов, тем точнее можно определить параметры для формулы 3.23 и 3.24, а также оценить стандартное отклонение значений энергии от модели.

Важное значение имеет разделение источников на распределенные и концентрированные, в том числе концентрированных на фоне распределенных. Наиболее простым и надежным способом в этом случае является статистический способ. При этом в качестве параметров статистической оценки является не только координаты источников, определенные расчетным или кластерным методом [8], но и отклонение значимых параметров каждого сигнала, принятого разными преобразователями, от кривой регрессии.

Для распределенных источников значение должно иметь определение объема, занимаемого им. Для таких источников АЭ значимым параметром является динамика изменения концентрации энергии источника при увеличении нагрузки.

Для концентрированных источников, представляющих высокую значимость для безопасной эксплуатации объекта, оценивать необходимо не только тип дефекта, но и стадию развития этого дефекта. Так развитие усталостной трещины сопровождается инкубационным периодом, периодом формирования трещины из микротрещин, равномерным ростом и стадией нелинейного ускорения трещины перед разрушением. При этом каждая из этих стадий включает, с точки зрения механики разрушения [224, 225] разные механизмы лишь частично связанные между собой. Это наводит на то, что решение задачи идентификации дефектов для АЭ метода требует более сложного алгоритма оценки по сравнению с предлагаемыми авторами [34, 151].

С другой стороны высокое число сигналов значение при неравномерной чувствительности контроля (которая получается у сложно нагруженных объектов) может быть обусловлена именно высокой чувствительностью или наложением ложных источников, что также необходимо учитывать при анализе результатов исследований. Таким образом, неравномерное распределение числа сигналов по зонам контроля требует дополнительного внимания и анализа этих зон. А в процессе анализа источников АЭ в литых деталях необходимо разработать критерии и алгоритмы идентификации источников, в том числе ложных сигналов, не связанных с прочностью и долговечностью работы деталей.

Важным результатом АЭ диагностирования должна быть идентификация источников и их разделение в процессе АЭ испытаний. Это задача, которую можно решить только научившись выделять из потока сигналов те, которые относятся к данному источнику. Несмотря на то, что в ряде исследований [8, 15] в этом направлении разработаны важные методики локации источников АЭ, в данной работе необходимо развить методические аспекты, повышающие достоверность идентификации дефектных участков.

### **Выводы по третьей главе**

Разработана математическая модель формирования сигнала АЭ с учетом диаграммы направленности источника и акустического тракта в объекте. Модель учитывает формирование колебаний в области приемника с учетом затухания волны, произвольной направленности источника в объекте любой толщины и нахождения источника на любой глубине. При этом в модели также учитывается, что пьезоэлектрический преобразователь регистрирует только нормальную к поверхности составляющую колебаний.

Анализ полученной модели позволил рассчитать приближенные волновые пакеты сигналов приходящих к приемнику с учетом расстояния до него от источника. Расчеты показывают, что волновые пакеты сигналов от модели развивающейся трещины похожи и для идентификации развивающейся магистральной трещины в любом направлении схожесть сигналов хорошо характеризует высокий коэффициент взаимной корреляции сигналов АЭ от такого источника. Расчетные данные требуют экспериментальной проверки на изделиях с реальными развивающимися дефектами.

Коэффициент взаимной корреляции сигналов АЭ позволит выделить из потока сигналов в локальной области сигналы одной природы, связанные между собой одинаковыми физическими процессами. Однако, коэффициент корреляции следует использовать как критерий развивающейся трещины только в случае удаления источника от приемника на расстоянии большем чем толщина объекта контроля в несколько раз (более 2).

В качестве основного потокового параметра предлагается использовать энергию сигналов, а также параметры степенной связи энергии с характеристиками напряженного состояния материала, таких как относительное к пределу прочности напряжение или КИН для трещин. Ввиду того, что на напряженное состояние материала в сложной детали влияют различные факторы необходимо определить параметры степенного роста (коэффициент произведения и показатель степени) и оценить их устойчивость в процессе реальных испытаний, как образцов, так и реальных объектов.

Для адекватной оценки состояния объекта необходимо определять тип дефекта и стадию его развития. Учитывая, что теоретические наработки, такие как [34] носят обобщенный характер, что вносит достаточно большую неопределенность в результаты оценки необходимо провести исследования и определить параметры, позволяющие более точно оценивать состояние источников АЭ.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ В ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ И НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

### **4.1. Исследования параметров акустической эмиссии в образцах без концентраторов**

На первом этапе были исследованы плоские образцы из стали 20ГФЛ, не имеющие концентраторов. Основные результаты исследований представлены в работах [226, 227].

Для экспериментальных исследований потоковых параметров АЭ были изготовлены плоские образцы из сталей 20 и 20ГФЛ в состоянии поставки (нормализация). Образцы не имели концентраторов напряжений и были изготовлены размерами, предусмотренными ГОСТ 9651–84 «Металлы. Методы испытания на растяжение при повышенных температурах». Общий вид исследованных образцов представлен на рисунке 4.1. Исследования проводили при одноосном растяжении образцов с постоянной заданной скоростью деформации 0,01 мм/с и с регистрацией силы нагрузки.

Все измерения параметров АЭ проводили с помощью системы СЦАД 16.03 и двух преобразователей, установленных на расстоянии 200 мм друг от друга на краях рабочей зоны деформирования образца. Для регистрации сигналов АЭ была установлена максимальная чувствительность каналов по амплитуде, соответствующая превышению уровня шумов в 3 раза и в абсолютных единицах равная 15 мкВ. Относительную чувствительность определить не удалось, так как сигналы от имитатора Су-Нильсена превышали диапазон измерительной АЭ системы (бо-

лее 40 дБ при минимально возможном коэффициенте усиления 100). Коэффициент усиления каналов – 1 000. Третий образец был испытан при пониженном уровне чувствительности, когда порог чувствительности по амплитуде был повышен в 20 раз (на 26 дБ), это было сделано для снижения числа регистрируемых сигналов АЭ, что позволяет уменьшить число пропусков актов АЭ. Регистрировали все сигналы, разность времени прихода, которых позволяла их идентифицировать из рабочей области деформирования. В общей сложности было испытано пять образцов до полного разрушения.

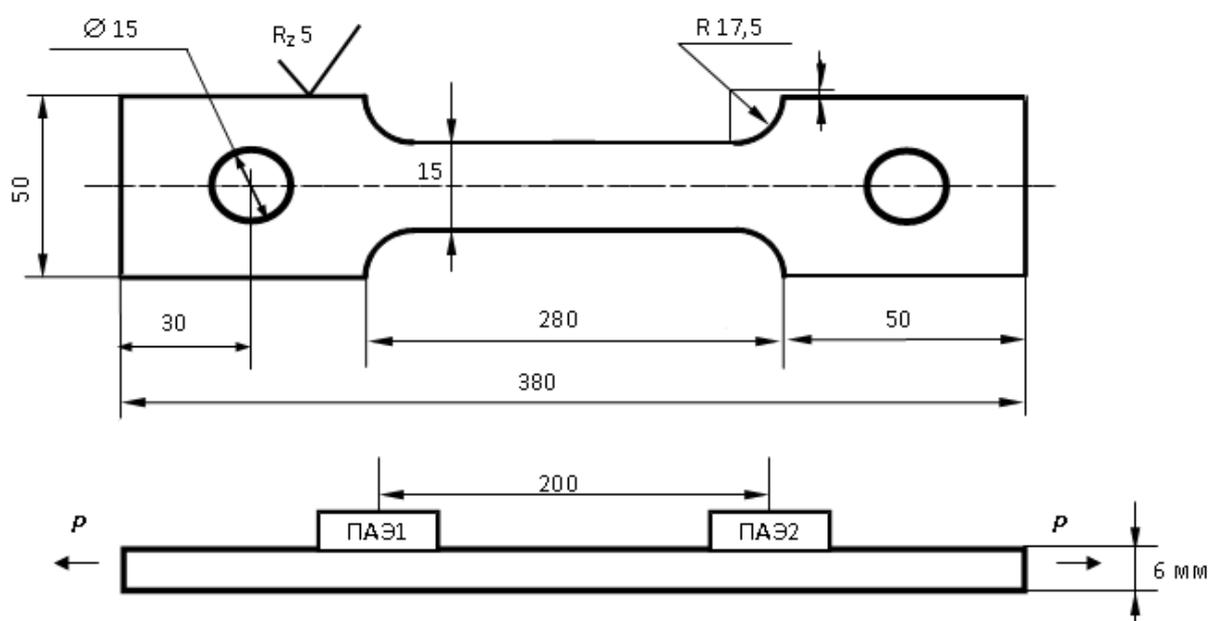
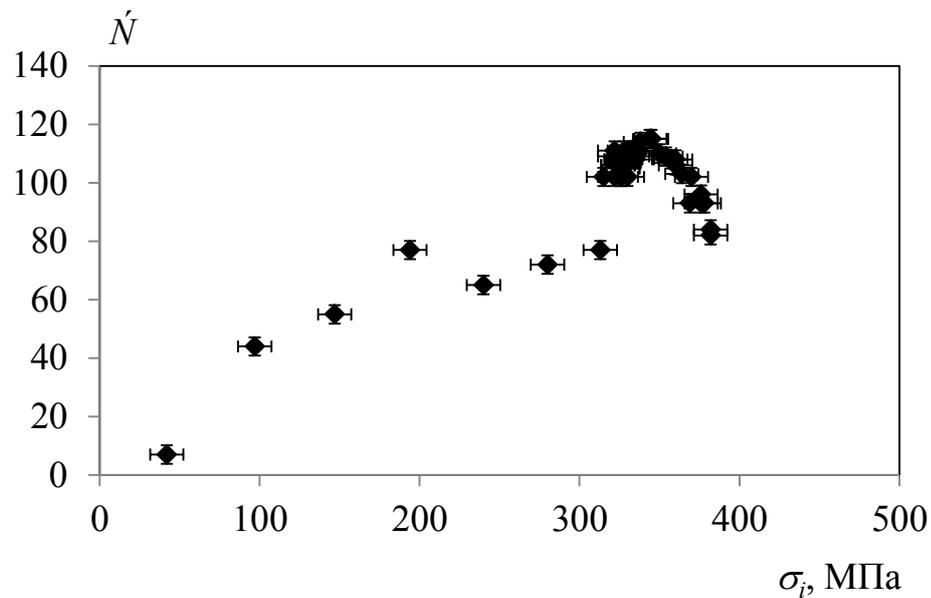


Рисунок 4.1 – Геометрические размеры исследованных образцов без концентраторов

Полученные результаты показывают, что большинство сигналов АЭ (более 80 %) были низкоамплитудными и несли энергию, не превышающую 0,01 % каждый от суммарной энергии  $E_{\Sigma}$  всего испытания для каждого из разрушенных образцов.

На рисунке 4.2 представлены результаты приращения суммарного счета сигналов АЭ  $N_{\Sigma}$  и суммарной энергии  $E_{\Sigma}$  в зависимости от времени нагружения образцов № 1 и 3. На рисунке также приведен график изменения относительного напряжения в образце. Аналогичные результаты получены при испытании образца № 2.

a)



б)

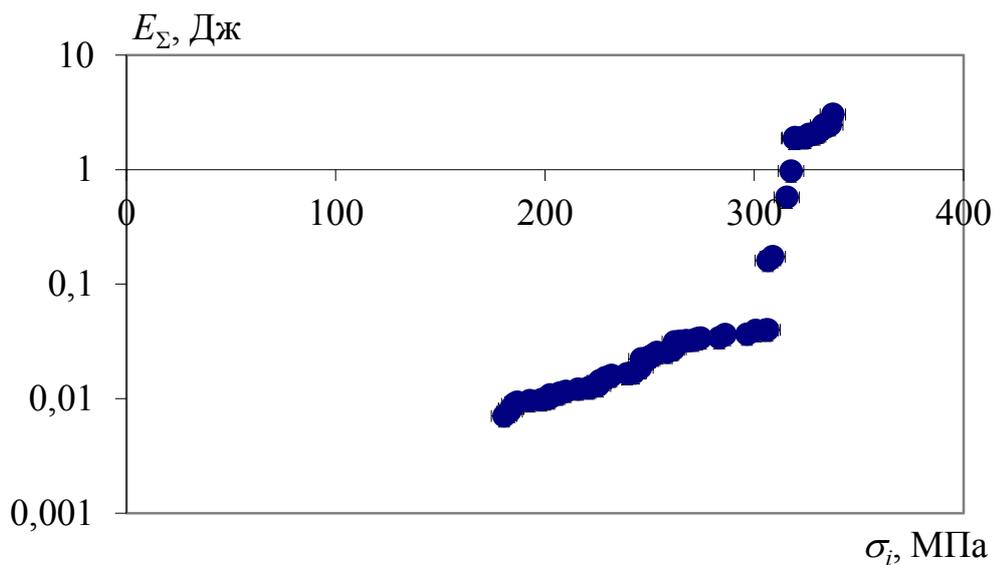


Рисунок 4.2 – Изменение потоковых параметров АЭ при увеличении напряжений в образцах: активности (а) и суммарной энергии  $E_\Sigma$  сигналов (б) при статическом нагружении в упругой и начале пластической области деформации

Как видно из рисунка 4.2 на ранней стадии упругой деформации прослеживается связь уровня напряжений, как с активностью, так и с энергией сигналов, принятых на этой стадии. Это позволяет четко определять стадию деформирования как по энергии сигналов АЭ за время испытаний, так и по их активности.

Анализ локации источников АЭ показывает, что и на стадии упругой деформации сигналы регистрируются из разных локальных участков деформируемой области. При пластической деформации сигналы приходят частично из разных локальных областей, а частично из пластической области. И только на конечной стадии перед разрушением можно говорить о том, что в области предстоящего разрушения выделяется область, в которой плотность сигналов выше, чем в остальной рабочей области образца. Это обстоятельство не позволяет выделить область пластической деформации из общей рабочей деформируемой зоны образца. Связано это, по всей видимости, с тем, что вся деформируемая зона находится в состоянии высоких напряжений на границе упругой и пластической деформации и проявляет локальные изменения структуры в виде сигналов АЭ из разных участков напряженной зоны.

Кроме того, зарегистрированные сигналы на ранних стадиях деформирования показывают, что уже в рабочей области в разных ее участках происходят процессы высвобождения упругой энергии, связанные с достаточно крупными разрушениями. Это означает, что в общем потоке сигналов были зарегистрированы такие, у которых амплитуда превышала порог срабатывания на 20 дБ и позволяла с достаточно высокой точностью определять местоположение источника в деформируемой зоне. Однако подобные сигналы единичны, они выделяются на фоне сигналов, несущих малые энергии, и всегда находятся в разных локальных областях.

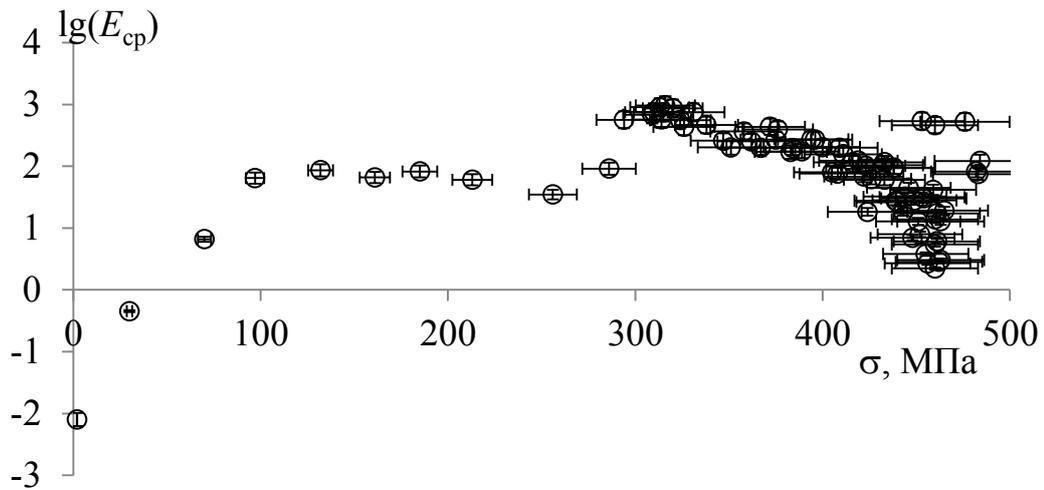
С точки зрения последующих испытаний реальных объектов и оценке состояния объектов диагностики из низколегированных сталей важно рассмотреть связь характеристик АЭ с механическим напряжением, испытываемым контролируемым участком. С учетом этого была определена усредненная энергия сигнала за каждый минутный интервал времени:

$$E_{\text{ср}} = \frac{\sum_i^n E_i}{N_n}, \quad (4.1)$$

где  $\sum_i^n E_i$  – суммарная энергия сигналов за интервал времени испытаний пропорциональный величине деформации,  $N_n$  – число сигналов АЭ за этот интервал времени при равномерном повышении деформации.

Зависимость средней энергии сигналов АЭ за интервал времени от напряжения для образцов № 1 и 3 представлены на рисунке 4.3.

а)



б)

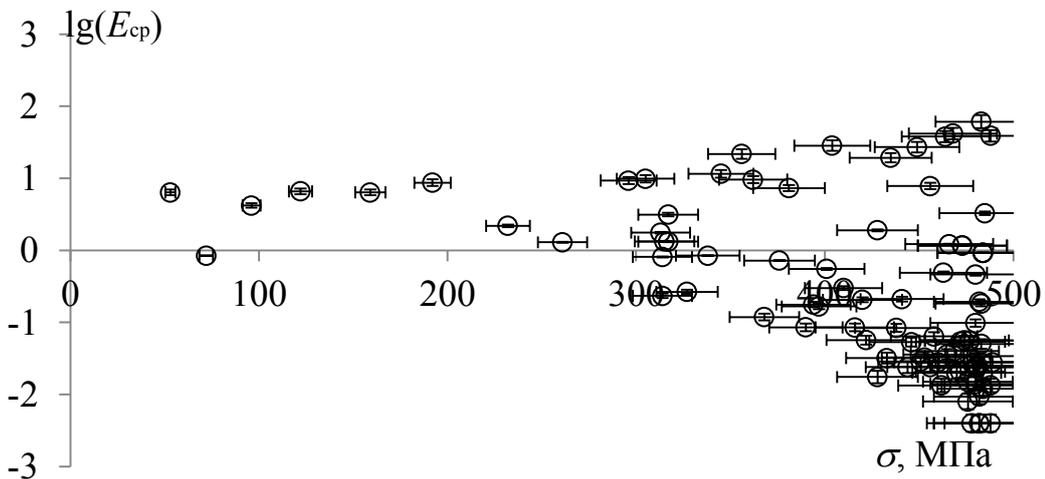


Рисунок 4.3 – Зависимость энергетического параметра  $\lg(E_{cp})$  от относительного напряжения в металле испытываемых образцов № 1 (а) и № 3 (б)

Физический смысл зависимости  $E_{cp}$  за относительно небольшой интервал времени испытаний от напряженного состояния заключается в том, что по этому показателю всех сигналов АЭ, зарегистрированных из всей контролируемой обла-

сти, можно с определенной погрешностью найти напряженное состояние этой области. В этом смысле  $E_{\text{ср}}$  более достоверный параметр, так как он менее зависим от случайных актов разрушения отдельных структурных неоднородностей материала, влияющих на энергетические параметры отдельных актов АЭ. С другой стороны, следует понимать, что смещение этой зависимости определяется и чувствительностью контроля, что хорошо видно из сравнения рисунков 4.3, а и 4.3, б.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в упругой области деформации (фактически от начала эксперимента) значения средней энергии достигают уровня выше  $8,4 \cdot 10^{-4}$  Дж и держатся на этом уровне вплоть до пластической деформации. После того как начинается стадия пластического упрочнения, средняя энергия сигналов постепенно снижается, что видно на рисунке 4.3, а, для образцов № 1 и 2 из стали 20. У образца из стали 20ГФЛ (см. рисунок 4.3, б) снижение средней энергии сигналов в пластической области деформации сопровождается достаточно частыми всплесками этого параметра ввиду присутствия отдельных мощных сигналов.

Далее анализировали корреляционные параметры сигналов АЭ. Коэффициент взаимной корреляции сигналов  $k_{ij}$  определяли по формуле:

$$k_{ij} = \left[ \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ j=1+S}}^n (a_i - \bar{a}_i)(a_j - \bar{a}_j)}{n \cdot \delta_i \cdot \delta_j} \right] \rightarrow \max, \quad (4.2)$$

где  $a_i$  и  $\bar{a}_i$  – значение амплитуды сигнала в каждой точке дискретизации  $i$ -го сигнала от данного источника и его среднее значение;  $a_j$  и  $\bar{a}_j$  – значение амплитуды сигнала в каждой точке дискретизации  $j$ -го сигнала от данного источника и его среднее значение;  $n$  – число точек дискретизации, использованных для определения коэффициента корреляции;  $\delta_i$  и  $\delta_j$  – дисперсии амплитуды  $i$ -го и  $j$ -го сигналов;  $S$  – временное смещение сигнала.

Анализ корреляционных параметров показывает что коэффициент взаимной корреляции волновых пакетов  $k_{ij}$  имеет невысокие значения и в упругой и в пластической области даже из локального участка деформирования образцов без концентраторов, что видно из рисунка 4.4, где  $N_i$  и  $N_j$  порядковые номера принятых сигналов от источника.

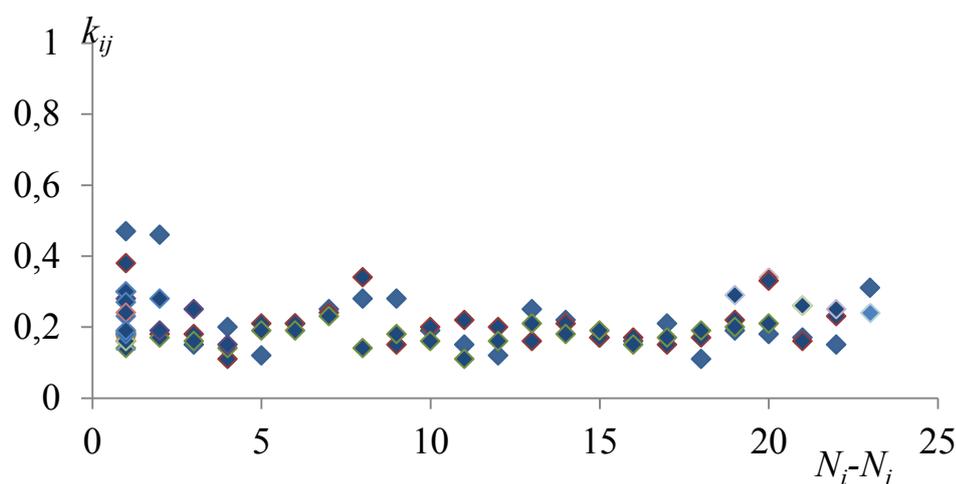


Рисунок 4.4 – Значения коэффициента  $k_{ij}$  для сигналов из области упругой и пластической деформации из локальной области

Усреднение коэффициента  $k_{ij}$  по нескольким соседним сигналам в пределах 30...50 МПа показывает, что  $k_{(ij)cp}$  не превышает 0,3 на всех интервалах нагружения и при упругой и при пластической деформации локального участка. Однако в области пластической деформации наблюдаются результаты аналогичные упругой области. Однако появляются группы сигналов коэффициент  $k_{ij}$  которых выше 0,4. Число сигналов в группе и количество таких групп может достигать пяти в зависимости от длительности деформации. Однако в целом среднее значение коэффициента  $k_{(ij)cp}$  ниже 0,35.

Другой корреляционный коэффициент характеризует стабильность диаграммы направленности источника. Для этого использовались максимальные амплитуды сигналов, принятых разными преобразователями, геометрически находящимися с разных сторон от источника. Для этого введен коэффициент корреляции значений максимальной амплитуды для всех сигналов  $k_U$ :

$$k_U = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{1i} - U_{1cp})(U_{2i} - U_{2cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{1i} - U_{1cp})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{2i} - U_{2cp})^2}}, \quad (4.3)$$

где  $N$  – число сигналов от источника;  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$  – максимальная амплитуда  $i$ -того сигнала от источника принятого первым и вторым ближайшими к источнику приемниками соответственно;  $U_{1cp}$  и  $U_{2cp}$  – средняя максимальная амплитуда сигналов от источника принятого первым и вторым ближайшими к источнику приемниками соответственно. Следует отметить, что для анализа параметра  $k_U$  должен использоваться ограниченный диапазон амплитуд (например, 14 или 20 дБ), так как большие диапазоны значений приводят к тому, что малое число сигналов с большой амплитудой существенно искажают значение коэффициента при неравномерном распределении сигналов на шкале амплитуд. Это связано с тем, что в практике анализа источников АЭ, как развивающихся дефектов, сигналы с низкой амплитудой почти всегда преобладают, и существенно, по сравнению с сигналами с большой амплитудой.

Коэффициент  $k_U$  в пластически деформируемой области несколько снижается по сравнению с упругой областью, что видно на рисунке 4.5. Это свидетельствует о том, что в качестве источников в локальной области пластической деформации генерируются новые механизмы, что принципиально известно из литературы по деформированию [223].

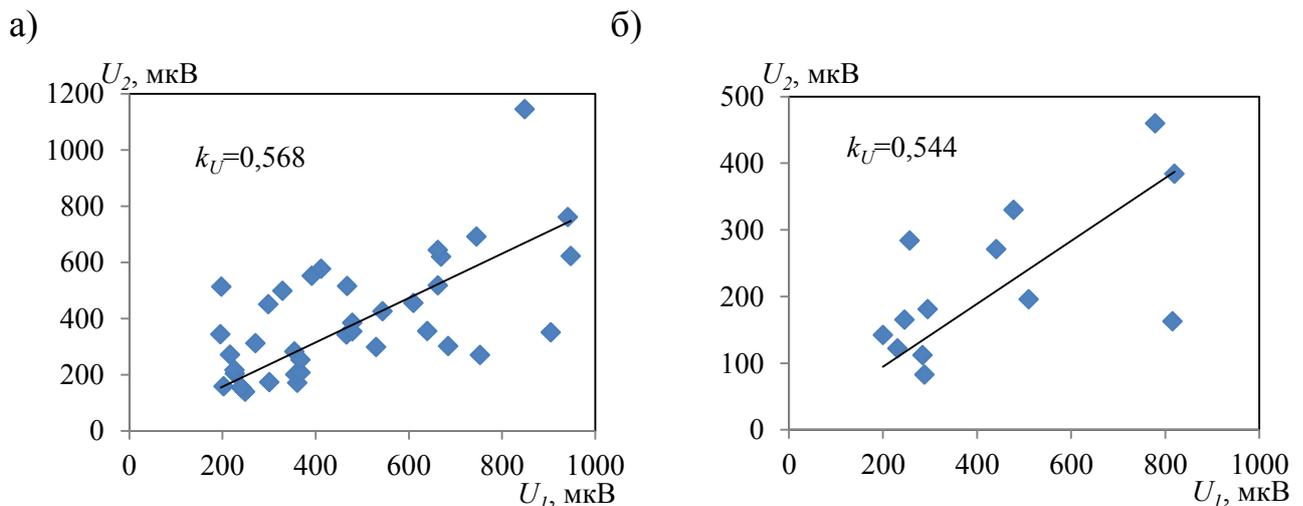


Рисунок 4.5 – Распределение сигналов АЭ в зависимости от максимальной амплитуды сигналов принятых двумя ближайшими к источнику приемниками в области упругой (а) и пластической (б) деформации

Следует отметить, что результаты испытаний реальных объектов, уже подвергавшихся деформированию в процессе эксплуатации, могут быть сильно искажены на стадии нагрузок, не превышающих рабочие для данного объекта контроля, вследствие эффекта Кайзера.

АЭ при деформировании образцов без концентраторов обладает низкой концентрацией источников. На стадии пластической деформации, конечно, можно выделить этот пластический участок, однако он находится на фоне сигналов из окружающей упругой области.

Дополнительно следует отметить, что сигналы у упругой области обладают относительно малыми амплитудами и, соответственно, собственной энергией. Однако в образцах из литой стали доля сигналов с амплитудой, превышающей 20 дБ относительно порога и соответственно с высокой энергией возрастает. Это может быть связано с более неоднородной структурой литых изделий, в которой локальные области с низким напряжением разрушения встречаются гораздо чаще. Приближение к моменту разрушения сопровождается существенным повышением числа сигналов с высокой амплитудой и энергией. Так и в упругой и в пластической области, вплоть до стадии упрочнения перед разрушением, число сигналов превышающих порог срабатывания на 20 дБ и более меньше 0,2 от общего числа зарегистрированных в этот период сигналов. На стадии предшествующей разрушению число таких сигналов возрастает вплоть до того что за последний временной интервал (5 % от всего времени испытания) принимаются только высокоэнергетичные сигналы АЭ.

Однако приведенные данные свидетельствуют о следующих результатах:

- сигналы как в упругой, так и в пластической области деформации обладают коэффициентом взаимной корреляции  $k_{(ij)cp}$  ниже 0,35 и относительно небольшим коэффициентом  $k_U$  – не более 0,6;
- в упругой области наблюдается рост активности сигналов АЭ, в то время как в пластической он остается практически неизменным и даже иногда снижает-

ся при анализе в узких интервалах приращения нагрузки (что характерно для реальных испытаний объектов контроля);

- при анализе энергии сигналов АЭ наблюдается ее рост как в упругой, так и в пластической области, однако на стадии перехода от упругой деформации к пластической происходит перелом зависимости и резкий рост суммарной энергии сигналов АЭ;

- как в упругой области, так и на большей части пластической деформации уверенно локализовать место разрушения, при чувствительности, реализуемой в производственных условиях, практически невозможно;

- стадия пластической деформации независимо от активности источника характеризуется увеличивающимся разбросом амплитуд и энергии сигналов от источника АЭ, то есть в качестве критерия состояния пластически деформируемой области можно использовать дисперсию амплитуды или энергии сигналов.

Приведенные выводы можно использовать при оценке напряженного состояния образцов и изделий из низкоуглеродистой и низколегированной литой стали для идентификации как упругой так и пластической деформации.

#### **4.2. Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах из низкоуглеродистых сталей с концентраторами при статическом растяжении**

Экспериментальные исследования поведения параметров АЭ проводили при статическом нагружении тринадцати стальных образцов (марок 20, 20Л и 45) на машине для статических испытаний типа МТС-50 с постоянной скоростью деформации 0,01 мм/с до разрушения. Основные результаты исследований были

опубликованы в работах [8, 227, 228]. Изготовленные образцы обладали плоской формой, а в середине рабочей части были изготовлены искусственные *V*-образные концентраторы напряжений (рисунок 4.6).

АЭ информацию регистрировали системой СЦАД 16.03, устанавливая на разных образцах от двух до четырех преобразователей АЭ. Порог чувствительности каналов устанавливали так, что он превышал на 20 дБ уровень максимумов собственных шумов аппаратуры. Калибровку чувствительности проводили с помощью электронного имитатора. Все преобразователи имели сигнал не ниже +14 дБ от порога срабатывания при генерации прямоугольного сигнала амплитудой 10 В с помощью аналогичного преобразователя, установленного в области концентратора напряжений.

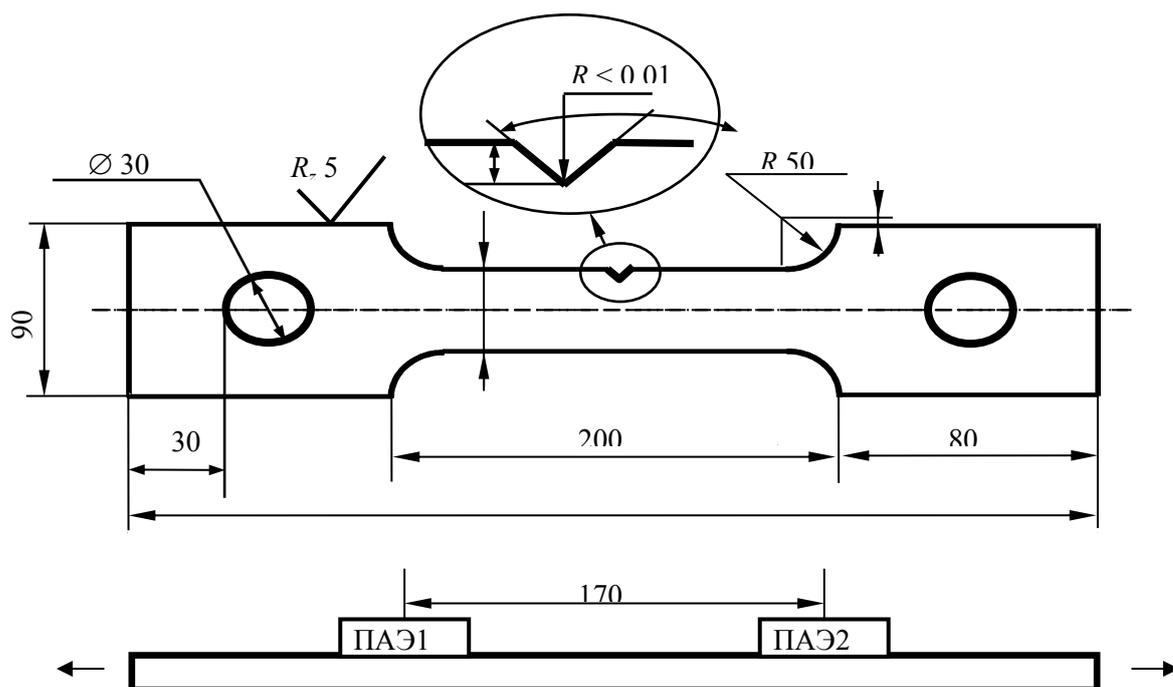


Рисунок 4.6 – Размеры испытательных образцов с установленными преобразователями АЭ

В процессе испытания регистрировали сигналы от источников АЭ, находящихся между преобразователями, в том числе сигналы от концентратора, которые можно распознать при линейной локации и корреляционном анализе, предложенном в работе [228]. На этом этапе задачей исследований стала идентификация ис-

точников сигналов АЭ, для чего были определены следующие основные измеряемые параметры: времена прихода на приемные преобразователи, их длительность и энергия. Кроме того, для анализа использовали оцифрованные волновые пакеты сигналов АЭ. Локация сигналов, как видно из рисунка 4.7, позволила разделить полученные сигналы АЭ на четыре группы:

- вызванные трением образца в области захватного механизма нагружающего устройства (область 1);
- связанные с деформацией (сначала упругой, а затем – пластической) в области концентратора напряжений (область 2);
- вызванные единичными локальными дискретными динамическими изменениями структуры в объеме образца в процессе его упругого деформирования;
- вызванные локальными поверхностными эффектами, например, отслоение окалины и других инородных материалов.

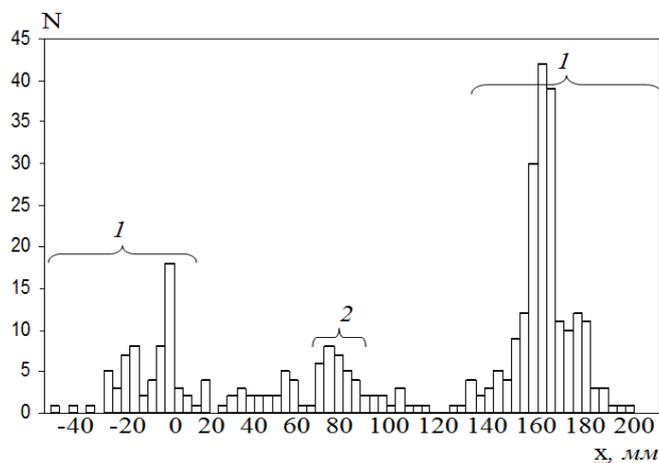


Рисунок 4.7 – Распределение числа сигналов АЭ по длине образца № 12 при линейной локации

Концентрация сигналов от источника (плотность) в виде развивающейся трещины или деформации на концентраторе выше минимум в три раза относительно плотности сигналов в области отсутствия концентратора. При этом это происходит на всем протяжении испытаний за исключением периода ниже предела выносливости.

#### 4.2.1. Анализ потоковых характеристик акустической эмиссии при статическом растяжении образцов с концентратором

При деформировании до разрушения разных образцов было получено различное количество сигналов АЭ – от 25 до 150. Во всех случаях отмечено, что при заданном уровне чувствительности первые сигналы АЭ появляются при напряжениях не менее  $0,2\sigma_B$ .

Как показали испытания, все образцы имели два варианта изменения параметров АЭ. В первом случае активность сигналов АЭ, приходящих из области концентратора, увеличивалась в двух явно выраженных областях: в окрестностях интервала времени перехода от упругой деформации к пластической; в интервале, предшествующем времени разрушения (рисунок 4.8, *а*). В другом случае после перехода от упругой деформации к пластической активность снижалась немного и не имела такого явного провала. При приближении к моменту разрушения активность незначительно увеличивалась (рисунок 4.8, *б*).

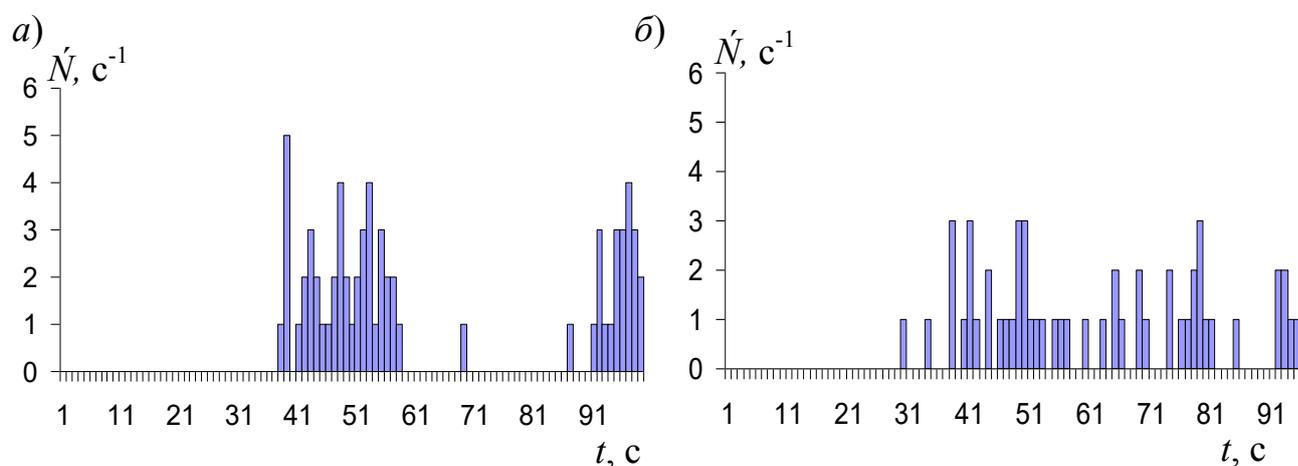


Рисунок 4.8 – Изменение активности АЭ в ходе испытаний образцов первого (*а*) и второго (*б*) типов поведения активности

В целом эти данные не противоречат другим экспериментальным данным, полученным при растяжении образцов из низкоуглеродистых сталей и в с первой группе [5, 14], и во второй группе образцов [229], но в последнем случае результаты были получены при внецентренном растяжении. Таким образом, результаты испытаний показывают, что даже при обычном одноосном растяжении плоских

образцов с малыми концентраторами возможны два различных варианта эволюции деформируемой области. Следует отметить, что при увеличении размеров концентратора, очевидно, повышается вероятность развития событий по второму сценарию. Для конструкций и деталей сложной формы при существенных различиях в видах напряженно-деформированного состояния (НДС) может быть реализован каждый из представленных сценариев деформирования и накопления АЭ информации. Однако в практике работы сложных конструкций на изгиб чаще, видимо, реализуется второй вариант, который характеризуется более высоким коэффициентом интенсивности напряжения (КИН) в области концентратора напряжений на всем протяжении АЭ испытаний.

Кроме того, из рисунка 4.8 видно, что активность сигналов АЭ, представленная в виде количества сигналов в секунду при различных скоростях нагружения, не является достаточно пригодной для анализа характеристикой, а требует дополнительного выбора интервала времени, позволяющего повысить его информативность. Статистические методы обработки потоковой информации в подобных случаях предлагают разбиение на количество интервалов, число которых соизмеримо с  $\sqrt{N}$ , где  $N$  – число событий. В нашем случае, когда при реальных испытаниях концентратор напряжений в виде трещины неизвестной площади может существенно изменять реальный порог максимального напряжения в локальной области при стандартной испытательной максимальной нагрузке, точно определить эффективное количество интервалов невозможно. Однако с учетом того, что чаще всего при АЭ испытаниях приходится работать с нагрузками, превышающими рабочие на 5...25 %, предлагается использовать 10 интервалов, когда стадия превышения рабочих нагрузок на объект уместается в 1...2 последних интервалах. Тогда сравнение с предыдущими интервалами в процессе нагружения, а также с результатами экспериментов на образцах будет нагляднее.. В этом случае изменение активности как число сигналов за  $0,1\sigma_B - \dot{N}_{0,1}$  для приведенных на рисунке 4.8 испытаний будет иметь вид, представленный на рисунке 4.9.

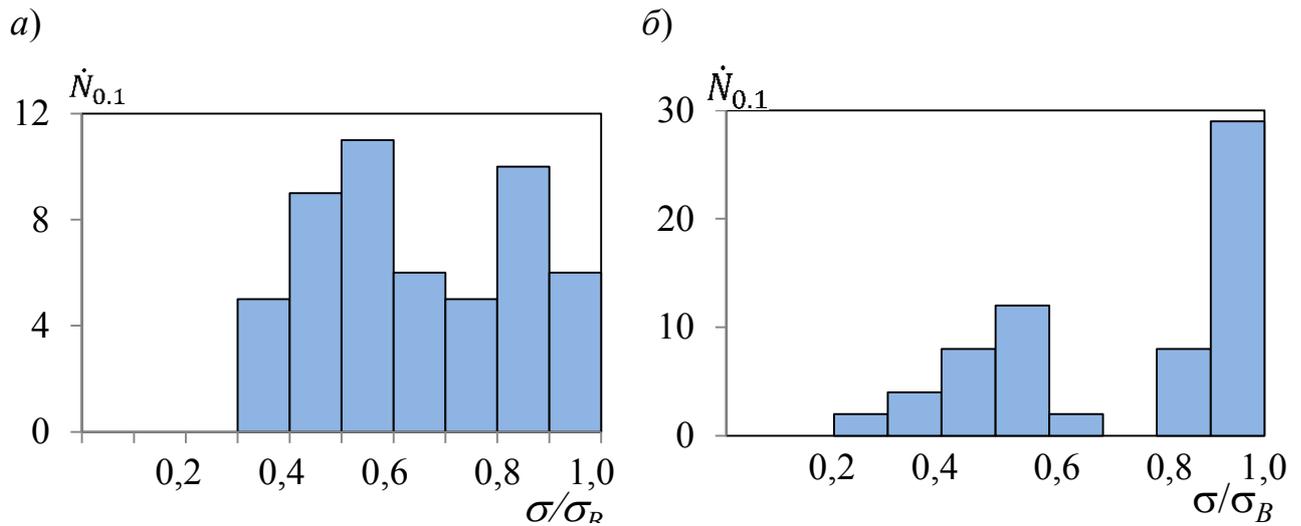


Рисунок 4.9 – Изменение приведенной к пределу выносливости активности АЭ  $\dot{N}_{0,1}$  в ходе испытаний образцов первого (а) и второго (б) типов

Предлагаемое представление активности АЭ сохраняет особенности развития участка разрушения и в то же время более полноценно помогает сопоставить активность в разные периоды деформирования испытываемого образца.

Рассмотрим полученные результаты с учетом эффекта Кайзера, возникшего вследствие приложения рабочих нагрузок. Возьмем рассматриваемый интервал напряженного состояния в диапазоне 100...125 % от рабочего интервала напряжений  $\sigma_r$ , который изменяется в зависимости от величины рабочей нагрузки.

Для первой группы образцов зависимость счёта АЭ и средней амплитуды сигналов, попадающих в интервал испытаний  $(1...1,25)\sigma_r$ , от собственно рабочей нагрузки представлен на рисунке 4.10, а, для второй группы – на рисунке 4.10, б. В представленных данных среднее значение амплитуды относительно порогового рассчитано для интервалов, в которых зарегистрировано минимум три сигнала АЭ из области концентратора.

Как видно из графиков, приведенных на рисунке 4.10, и полученных данных со всех исследованных образцов, в обоих вариантах НДС концентраторов сигналы АЭ из области источника начинают поступать при механическом напряжении в области концентратора от 110 до 150 МПа. При регистрации АЭ в интервале

напряжений (150...180) МПа соответствует потоку сигналов, количество которых превышает 5 за интервал наблюдения для обоих типов НДС концентратора.

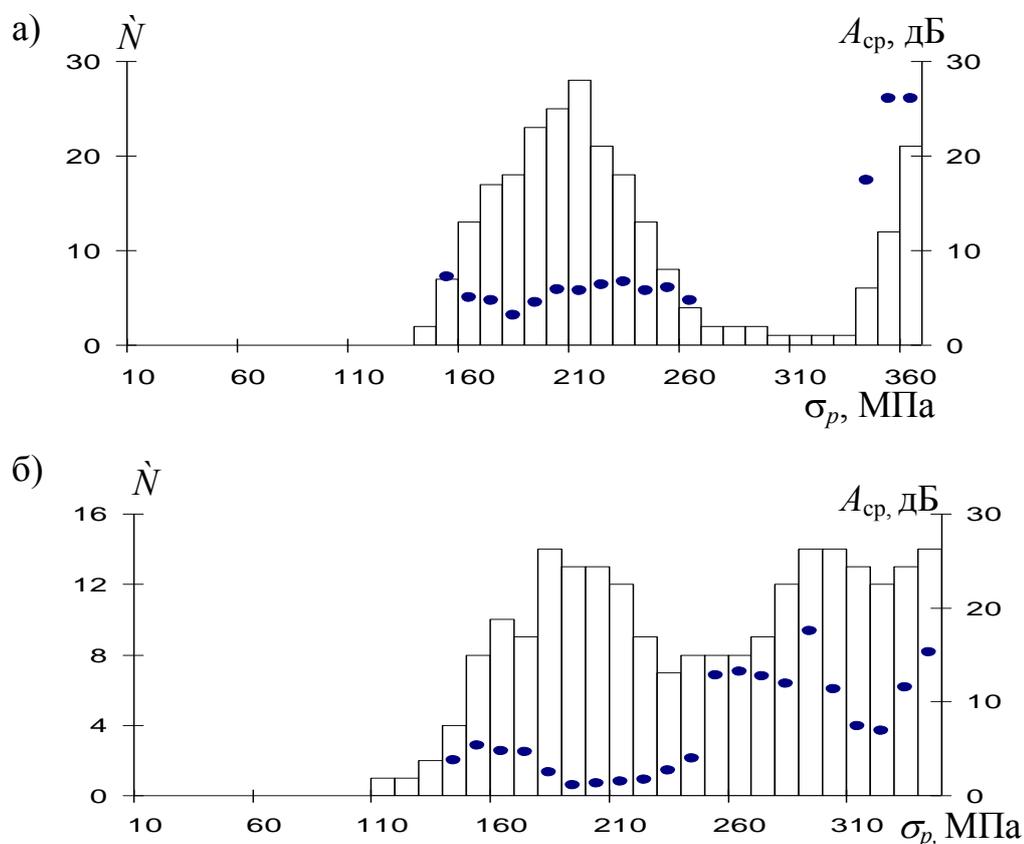


Рисунок 4.10 – Зависимость числа сигналов АЭ и среднего значения их амплитуд  $A_{cp}$  в интервале наблюдения  $\sigma_p \dots 1,25\sigma_p$  от значения  $\sigma_p$  для образцов с равномерным распределением напряжений в сечении концентратора (а) и при асимметричном напряженно-деформированном состоянии (б)

О состоянии материала по АЭ данным можно судить при напряжениях около 150 МПа и выше. Вместе с тем следует отметить, что предлагаемые интервалы нагрузки таковы, что наличие группы сигналов АЭ (три и более акта) свидетельствует о достижении напряженного состояния в области источника, приближенного к пределу выносливости для такого класса сталей.

Снижение величины испытательной нагрузки по отношению к рабочей приводит к заметному уменьшению числа актов АЭ в интересующий нас интервал напряжений. Изменение же параметров  $N$  и  $A_{cp}$  в процессе испытаний с заданным уровнем чувствительности не дает однозначного ответа на вопрос о величине напряжений в месте нахождения концентратора АЭ, поэтому для определения

НДС требуются другие параметры метода или проведение исследований с более высоким уровнем чувствительности.

Следует отметить, что с точки зрения диагностики АЭ методом интерес представляет не весь интервал нагружения, а первая его часть, причем следует выделить два характерных интервала от начала нагружения до предела выносливости материала и второй – до предела текучести, как наиболее значимые на пути деградации материала. Согласно [182, 183] стали для литых деталей тележек имеют предел прочности  $\sigma_B=490...520$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2}=300...350$  МПа, предел выносливости  $\sigma_{-1} = 170...200$  МПа. Следовательно, относительное значение предела текучести и предела выносливости будет следующим:

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} = 0,6...0,68; \quad (4.4)$$

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} = 0,34...0,37. \quad (4.5)$$

Характерные полученные результаты АЭ испытаний представлены на рисунке 4.11, из которого видно, что до достижения предела текучести из зоны концентратора можно говорить о высокой вероятности только одного сигнала АЭ с заданной чувствительностью. При достижении предела выносливости происходит второй акт АЭ, и только в промежутке напряжений между пределом выносливости и пределом текучести число актов АЭ достигает 16...30. Это число связано с общим числом актов АЭ из области концентратора и составляет примерно 50 % суммарного числа актов АЭ за всё время испытаний до разрушения.

Другой особенностью является наличие нескольких всплесков активности до 300 в относительных единицах и определяемой по формуле:

$$A = \frac{N_{\Delta\sigma}}{\Delta\sigma}, \quad (4.6)$$

где  $\Delta\sigma$  – интервал напряжений, в пределах которого зарегистрировано  $N_{\Delta\sigma}$  количество сигналов АЭ.

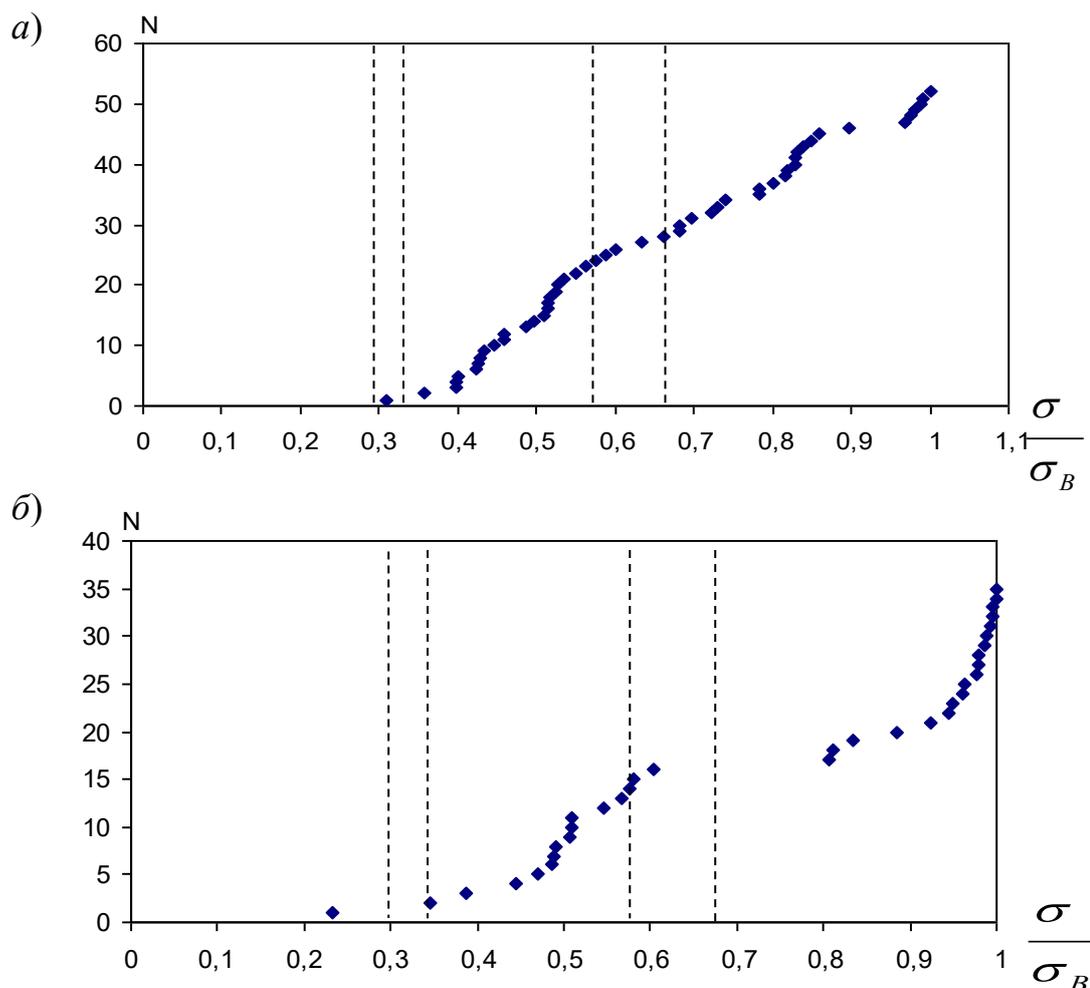


Рисунок 4.11 – Распределение зарегистрированных актов АЭ из области концентратора в зависимости от напряжения испытываемого концентратором для образцов № 1 (а) и № 2 (б)

На рисунке 4.12 показаны результаты исследования стального образца № 6, где линией 1 обозначена степенная зависимость распределения энергии излучения сигналов АЭ концентратором, описываемая аппроксимирующей функцией, предложенной в формуле (3.19) для числа сигналов и энергии. Во всех случаях растяжения образцов с концентратором отмечено, что суммарный счет растет по более крутой кривой. Это говорит о том, что показатель степени роста суммарной энергии сигналов АЭ выше, чем показатель степени роста суммарного счета.

Для аппроксимирующей функции коэффициент корреляции составил  $R_1 = 0,967$ . Аппроксимирующая зависимость суммарного счета сигналов АЭ, зарегистрированных при работе образцов на стадиях упругой и пластической деформации, показана кривой 2 на рисунке 4.12. Коэффициент корреляции для суммарно-

го счета равен  $k_r = 0,929$ . Показатель степени  $n$  в формуле (3.19) на разных стадиях нагружения изменяется в пределах от 1,75 до 7,21. Данный параметр можно использовать для оценки состояния каждого локального источника на разных стадиях нагружения.

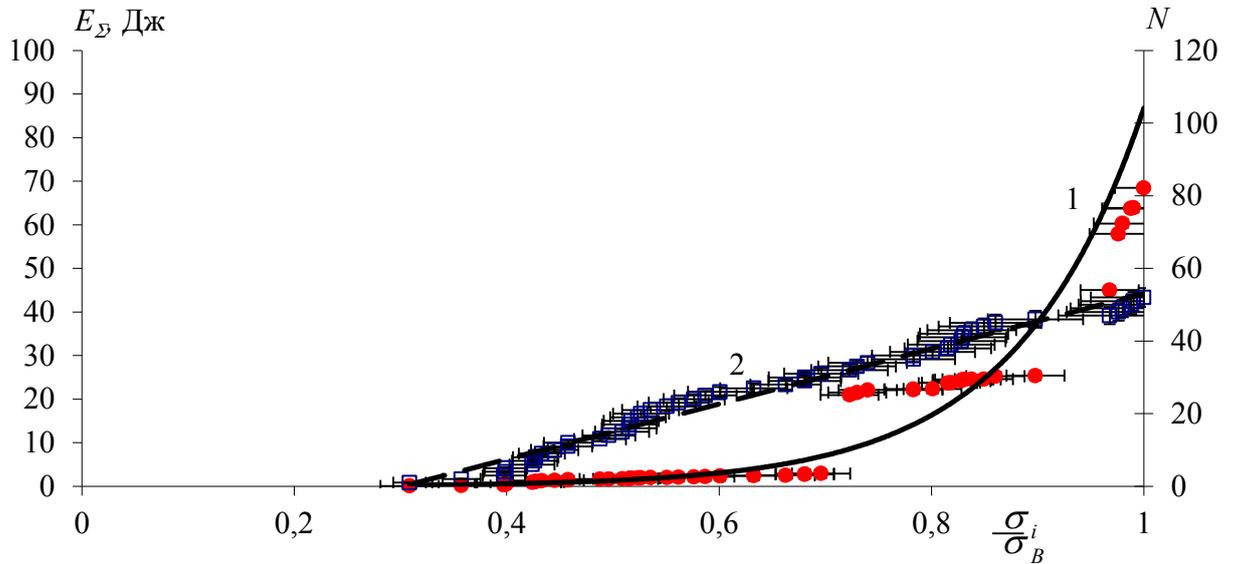


Рисунок 4.12 – Зависимость суммарной относительной энергии (1) и суммарного счета (2) от величины относительного механического напряжения в области концентратора

Вместе с тем, как уже говорилось, в процессе АЭ испытаний реальных объектов напряжения достигают некоторого конечного значения, которое ниже предела прочности материала, поэтому важно проследить изменения показателя степени  $n$  в отдельных интервалах напряжений. Так как максимальное значение рабочих нагрузок при АЭ испытаниях не превышает 125 %, то при анализе использовали диапазоны напряжений от 0,8 до 1,0 максимального значения диапазона и соответственно в расчет брали только те сигналы АЭ из области концентратора, которые попадали в этот диапазон напряжений. В свою очередь, для каждого диапазона определяли показатель степени  $n$ . Результаты такой обработки для суммарного счета и суммарной энергии этих диапазонов приведены на рисунке 4.13.

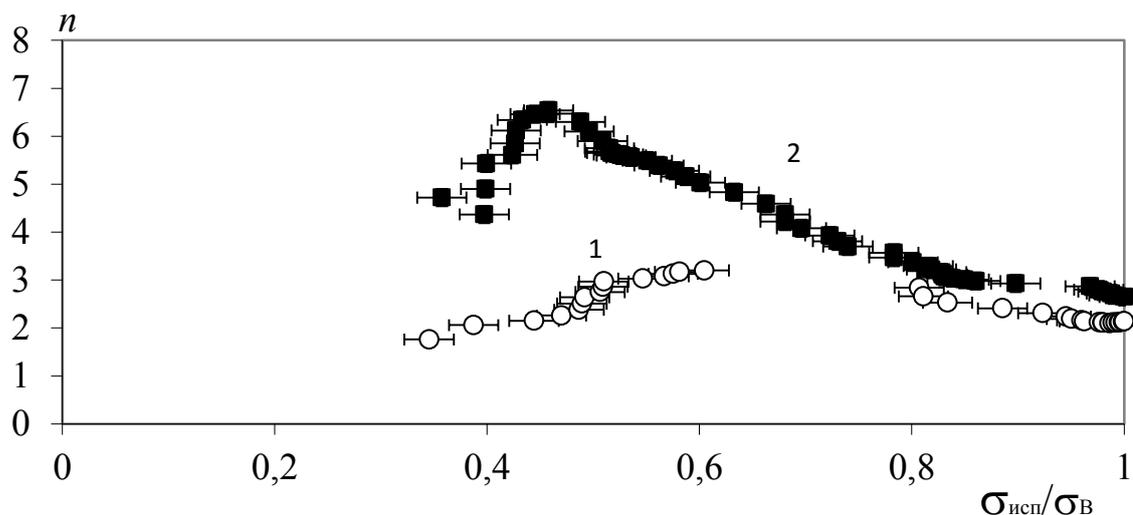


Рисунок 4.13 – Изменение показателя степени  $n$  степенной зависимости суммарного счета (1) и суммарной энергии (2) АЭ образца № 8

Полученные расчеты показывают, что показатель степенной функции для суммарного счета и суммарной энергии у образца № 8 с увеличением испытательной нагрузки сначала возрастает и для суммарного счета достигает максимума при нагрузках, близких к пределу текучести материала, и доходит до значений 3,2. Для суммарной энергии максимум показателя степени приходится на значение 0,48 максимума относительной к пределу прочности нагрузки. Показатель степени для суммарной энергии достигает значений 6,5. После достижения максимального значения оба показателя степени снижаются и при максимальной нагрузке испытаний, при которой происходит разрушение, – показатель степени составляет 2,1 и 2,6 для суммарного счета и суммарной энергии соответственно.

В работах В.В. Носова [34, 153] основным критерием оценки для развивающихся деградирующих систем с высвобождением упругой энергии в виде АЭ является коэффициент  $A$  в формуле 3.19. И его увеличение свидетельствует о приближении разрушения объекта в контроля в области очага АЭ. Однако при использовании статистической оценки степенных зависимостей в проведенных экспериментах коэффициент  $A$  имеет тенденцию к увеличению только в достаточно небольших диапазонах в пределах упругой деформации или отдельных участках неупругой. Это связано с тем, что При испытаниях образцы проходят

разные стадии напряженно-деформированного состояния, которые существенно отличаются механизмами деформирования и развития трещин.

Аналогичные изменения потоковых параметров АЭ были получены и с остальными образцами, что демонстрирует более высокую явную степенную зависимость энергетического параметра, а значит, определение напряжений по суммарной энергии будет более точным. При этом коэффициент корреляции по амплитуде сигналов, принятых двумя ближайшими к источнику приемниками  $k_U$  для концентратора без выращиваемой на нем дополнительными циклическими нагрузками трещины выше, чем при растяжении образца без концентратора, даже в упругой области. И при развитии трещины и при пластической деформации на концентраторе корреляционный параметр  $k_U$  во всех исследованных образцах был выше 0,9 (рисунок 4.14).

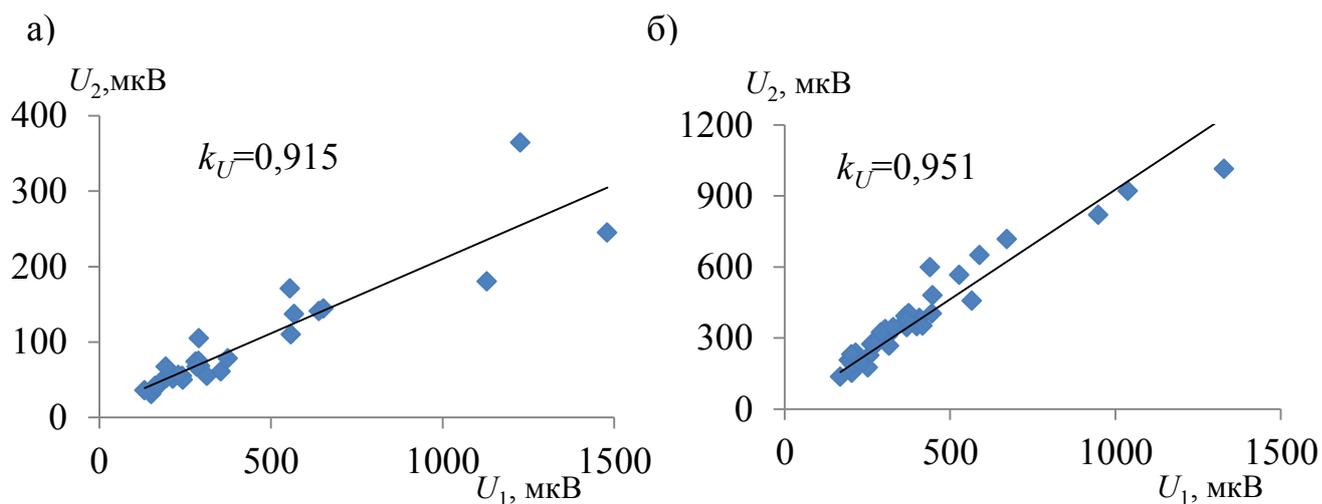


Рисунок 4.14 – Корреляционная связь амплитуд сигналов принятых приемниками, ближайшими к источнику, из области пластической деформации на концентраторе (а) и области развивающейся трещины на концентраторе (б)

#### 4.2.2. Экспериментальное исследование изменения индивидуальных параметров сигналов при деформировании образцов с концентраторами

Последующий анализ сигналов АЭ, зарегистрированных из области концентратора образцах из низкоуглеродистых сталей, показал, что по их можно разделить на три характерные группы. Сначала в упругой области материала из области концентратора сигналы АЭ практически отсутствуют и можно говорить о

случайном характере АЭ в этот период. Затем, при достижении напряжений около 0,35...0,38 от предела прочности (что соответствует достижению предела выносливости диагностируемого материала) и последующем приближении к моменту перехода от упругой деформации к пластической, происходит относительно регулярное излучение сигналов АЭ из области концентратора, амплитуда которых варьируется в пределах 15 дБ. По мере возрастания пластической деформации сначала увеличивается активность, а затем и амплитуда отдельных сигналов. Максимальные значения амплитуды и энергии сигналов АЭ достигаются в конечный интервал времени, предшествующий разрушению. Пример изменения напряжений и параметров АЭ в одном из образцов представлен на рисунке 4.15.

При этом внешний вид сигналов, особенно на стадии упругого деформирования и при переходе от упругой деформации к пластической, очень похож (рисунок 4.16).

Анализ волновых пакетов в разделе 3.2 и приведенные экспериментальные данные позволяют ввести новый параметр сигналов АЭ – коэффициент взаимной корреляции двух сигналов принятых одним преобразователем. Тогда необходимо провести анализ динамики изменения этого параметра не только для источника в виде концентратора напряжений, но и для остальных источников, таких как трение образца о нагружающее устройство, случайные сигналы из областей с меньшими напряжениями.

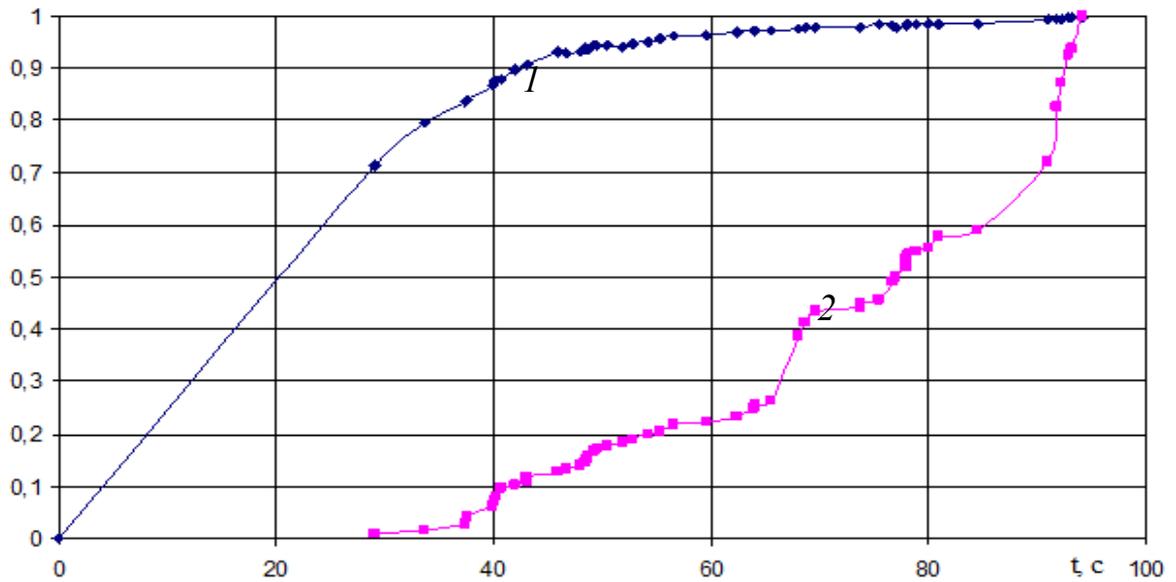
Для всех категорий сигналов провели оценку коэффициента их взаимной корреляции  $k_{ij}$  амплитудно-временного распределения волновых пакетов по формуле 4.1.

На разных стадиях деформации отмечены следующие закономерности изменений, проанализированных дополнительных параметров АЭ сигналов. Сигналы, пришедшие на первой стадии испытаний, до достижения нагрузок 170 МПа в области концентратора (рисунок 4.16, *а* и *б*) имеют высокие значения коэффициента взаимной корреляции (в среднем около 0,7). Так, для сигналов, представленных на рисунок 4.16 *а* и *б*, коэффициент взаимной корреляции составил 0,82.

a)

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$$

$$\frac{E_{\Sigma}}{E_{\Sigma\max}}$$



б)

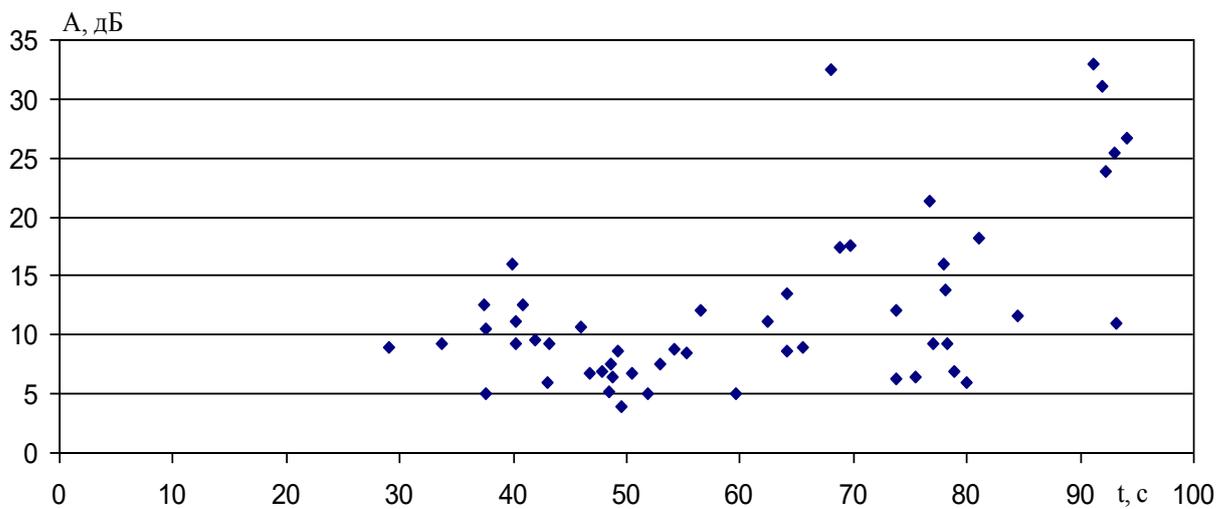


Рисунок 4.15 – Зависимость от времени относительного напряжения (а, кривая 1), относительной суммарной энергии (а, кривая 2) и амплитуды (б) сигналов АЭ, зарегистрированных из области концентратора при испытании образца № 16

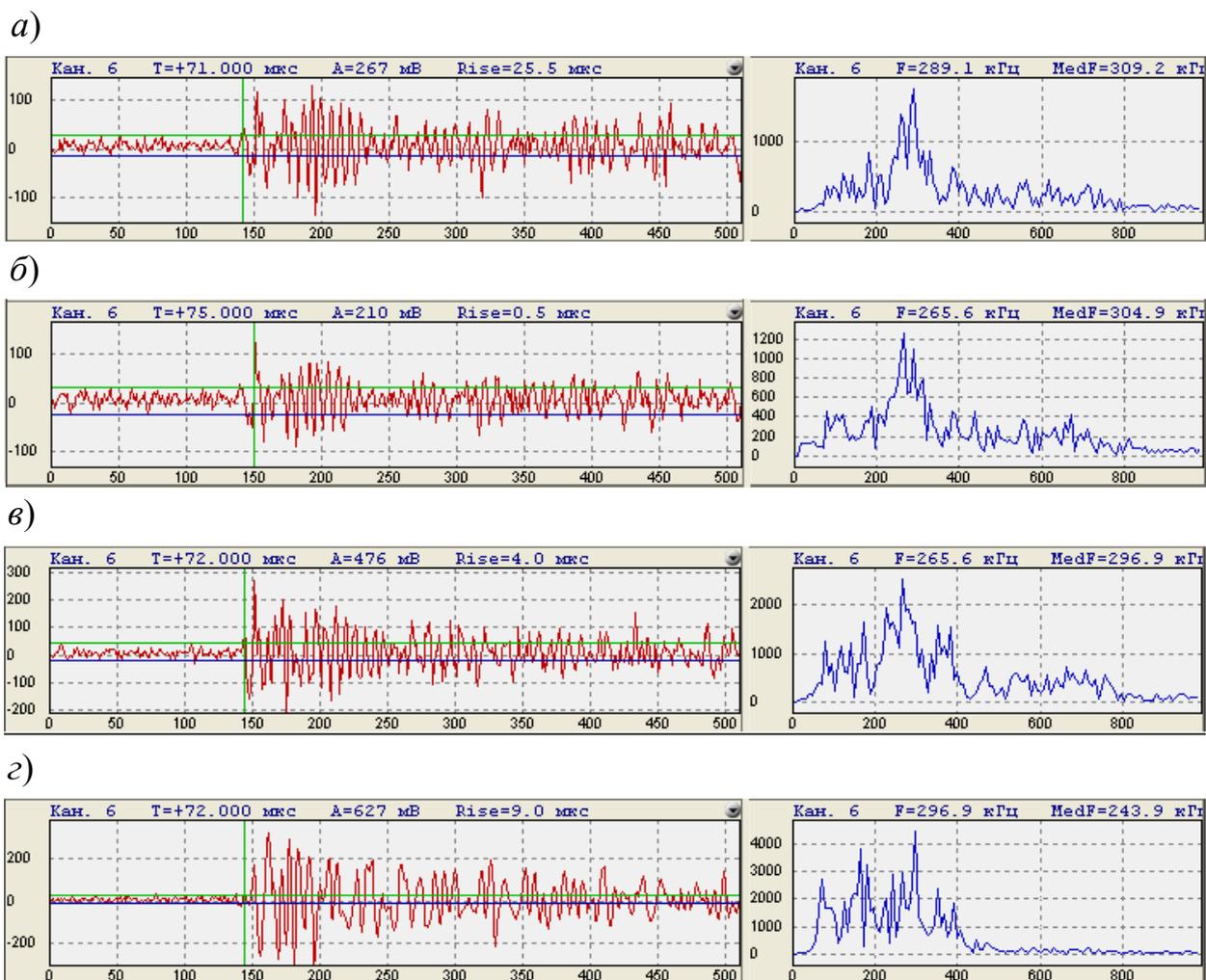


Рисунок 4.16 – Снятые с панели обработки системы сравнительные параметры зарегистрированных сигналов АЭ, одним и тем же каналом на разных стадиях деформации при напряжении в области концентратора 168,5 МПа (*a*), 188,2 МПа (*б*), 287,8 МПа (*в*) и 350,6 МПа (*г*)

При достижении напряженного состояния, близкого к пределу текучести, т.е. при переходе из упругой деформации к пластической коэффициент взаимной корреляции сигналов существенно уменьшается и наблюдается только для отдельных групп сигналов. Это может соответствовать тому, что на смену единому механизму формирования волн АЭ, наблюдаемому на упругой стадии, приходит несколько механизмов или их комбинации. Представленные сигналы на рисунке 4.16, *в* и *г* имеют коэффициенты взаимной корреляции с сигналами на рисунке 4.16, *а* и *б* в соответствии с таблицей 4.1. При этом в таблице автокорреляция сигналов равнялась 1, так как сигнал при совмещении полностью повторяет себя, в

верхней и правой части таблицы указаны коэффициенты взаимной корреляции АЭ сигналов, зарегистрированных преобразователем № 1, а в нижней и левой – та же характеристика для сигналов, зарегистрированных преобразователем № 2.

Таблица 4.1 – Коэффициенты взаимной корреляции сигналов АЭ, представленных на рисунке 4.16

Сигнал по рис. 4.14	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
<i>a</i>	1	0,82	0,33	0,19
<i>б</i>	0,82	1	0,32	0,17
<i>в</i>	0,21	0,17	1	0,16
<i>г</i>	0,28	0,26	0,23	1

Для дальнейшего анализа использовались относительные амплитудные значения, приведенные к максимальному значению амплитуды для каждого сигнала. Число *n* определяется как число точек временной дискретизации сигнала с минимальной длительностью по времени, зарегистрированной АЭ аппаратурой. 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 для образца № 8 представлены на рисунке 4.17.

Следует отметить, что полученные результаты анализа поведения коэффициента корреляции в области концентратора и области взаимодействия образца с захватами, через которые передавалась нагрузка, принципиально не отличаются по всем исследованным образцам.

На стадии упругой деформации в образцах с концентратором, в том числе с иницированной при циклических нагрузках трещины характеризуется относительно высокими значениями коэффициента взаимной корреляции. В этой области деформации  $k_{ij}$  почти всех пар сигналов выше 0,5 (рисунок 4.17, а).

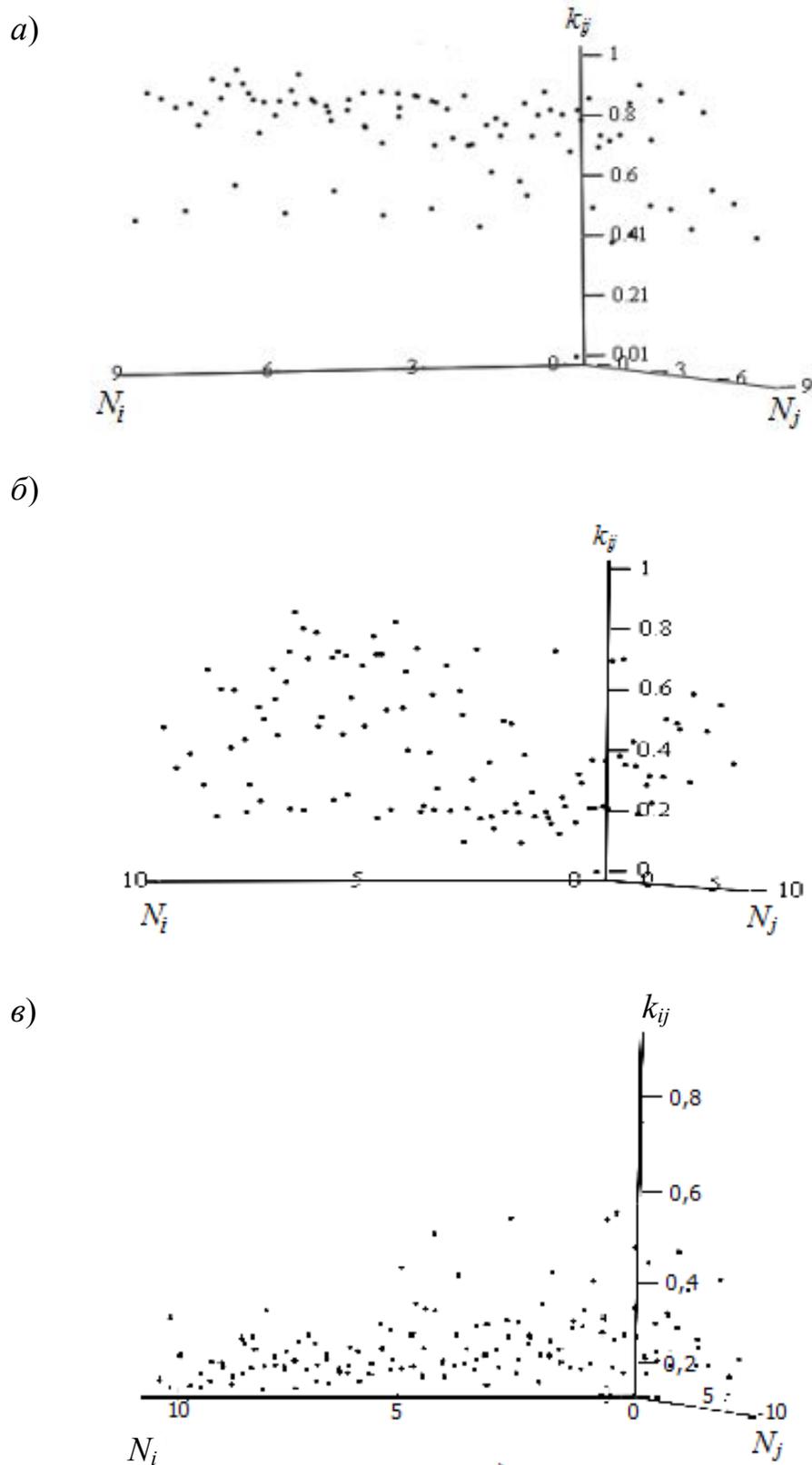


Рисунок 4.17 – Поле изменений коэффициента взаимной корреляции между сигналами АЭ из области концентратора при упругой (а), пластической (б) деформации и воздействия нагружающего устройства (в)

Переход в пластическую область деформации коэффициент взаимной корреляции из области концентратора несколько снижается (рисунок 4.17, б). Это означает, что на стадии необратимых процессов формирования очага разрушения происходит высвобождение упругой энергии одновременно по нескольким различным механизмам. Другой характерной особенностью изменений коэффициента взаимной корреляции  $k_{ij}$  является тот факт, что большинство соседних по времени сигналов из пластически деформируемого очага обладает высокой взаимной корреляцией.

Сигналы АЭ, связанные с трением элементов нагружающего устройства и образца, характеризуются в общем случае низким коэффициентом взаимной корреляции  $k_{ij}$  (рисунок 4.17, в), но между отдельными сигналами наблюдается высокое значение этого параметра (в отличие от области упругой и пластической деформации). Такие сигналы (с высоким значением  $k_{ij}$ ) имеют случайное распределение во временной области, их количество значительно изменяется от участка к участку и от образца к образцу.

Единичные локальные акты, связанные с деформацией внутри образца и на поверхности, дают сигналы АЭ, которые имеют низкий коэффициент взаимной корреляции. Сигналы из области упругой деформации концентратора напряжений обладают высоким коэффициентом корреляции, что соответствует идентичности локальных дискретных процессов, средний коэффициент корреляции составляет 0,6 и колеблется от 0,37 до 0,94. Упругая деформация из областей, где отсутствует концентратор, коэффициент корреляции источников колеблется в диапазоне 0,1...0,3 и среднее значение равно 0,2.

Для того, чтобы можно было оценить сигналы, связанные с локальными поверхностными отслоениями, из серии испытываемых образцов три подвергли отжигу при температуре 600 °С в течение 1 ч. Это привело к снятию внутренних напряжений, а значит, уменьшению локальных динамических изменений в структуре во всем объеме. Вместе с тем такая термическая обработка привела к образованию окалины на поверхности и резкому увеличению сигналов этого типа. Кор-

реляционный анализ таких сигналов показал, что все они обладают низким коэффициентом взаимной корреляции  $k_{ij}$  на всех стадиях деформации, за исключением отдельных случаев, которые соответствуют начальной стадии локации упругой деформации в отдельных объемах.

Таким образом, экспериментальные данные, полученные на металлических образцах при их статическом растяжении, показывают, что для идентификации источников сигналов АЭ в ряде случаев целесообразно использовать коэффициент взаимной корреляции сигналов из определенной локальной области. Это позволяет выделять области устойчивой упругой деформации, области пластической деформации из общего потока сигналов АЭ.

Кроме того, полученные данные позволяют их использовать в автоматическом режиме, что облегчает работу дефектоскопистов при интерпретации и оценке результатов диагностики.

Исследования поведения параметров АЭ при статическом нагружении образцов с концентраторами позволили выявить следующие закономерности:

- существенное различие динамики изменения параметров АЭ при упругой и пластической деформации;
- для всех образцов существует такой интервал времени между упругой и пластической областью деформации, когда активность АЭ сначала повышается, а затем существенно снижается;
- предразрывное состояние характеризуется высокими значениями энергии АЭ, в то время как спектральная плотность меняется незначительно;
- в процессе нагружения объектов сложной формы на различных участках могут реализовываться два различных сценария изменения потоковых характеристик АЭ, связанных с различием коэффициентов интенсивности напряжений локальных концентраторов;
- АЭ параметры при установленной в эксперименте чувствительности приемных преобразователей не позволяют судить о численном значении напряженного состояния в области локального источника в виде  $V$ -образного

концентратора, но по активности АЭ в интервале нагрузок, превышающих рабочие, можно качественно определить стадию напряженно-деформированного состояния;

- для всех образцов достижение напряжений в области концентратора, близких пределу выносливости, сопровождалось появлением устойчивой АЭ;
- при внецентренном напряженно-деформированном состоянии концентратора достижение предела текучести сопровождается некоторым снижением активности и повышением среднего значения амплитуды сигналов АЭ и суммарной энергии сигналов из области концентратора;
- при относительно равномерном напряженном состоянии сечения концентратора, АЭ при приближении к пределу текучести существенно уменьшается, вплоть до единичных сигналов АЭ в интервале испытательных напряжений  $1 \dots 1,25\sigma$ , что существенно снижает информативность АЭ диагностики объектов с концентраторами, находящимися в описанном НДС;
- для обеспечения высокой концентрации напряжений в контролируемых областях следует обеспечивать внецентренное напряженное состояние для максимального объема контролируемых объектов;
- увеличение информативности параметров регистрируемой АЭ требует повышения чувствительности каналов аппаратуры по сравнению с использованной в описанных выше экспериментах.

### 4.3. Исследование параметров акустической эмиссии при циклическом нагружении образцов с концентраторами

При исследованиях объектов, подвергающихся в процессе эксплуатации циклическим нагрузкам, важно представлять, как развиваются усталостные дефекты и как изменяются характеристики АЭ в процессе развития трещин.

Поэтому были проведены циклические испытания образцов из стали Ст3пс с концентраторами в виде пропилов глубиной 10 мм на образцах, идентичных по размерам (рисунок 4.18), и толщиной 6 и 8 мм (по три образца для каждой толщины). Испытания проводили на испытательной машине MTS-50 путем растяжения образцов с частотой нагружения – 7 Гц и максимальной амплитудой цикла, равного 122,5 кН.

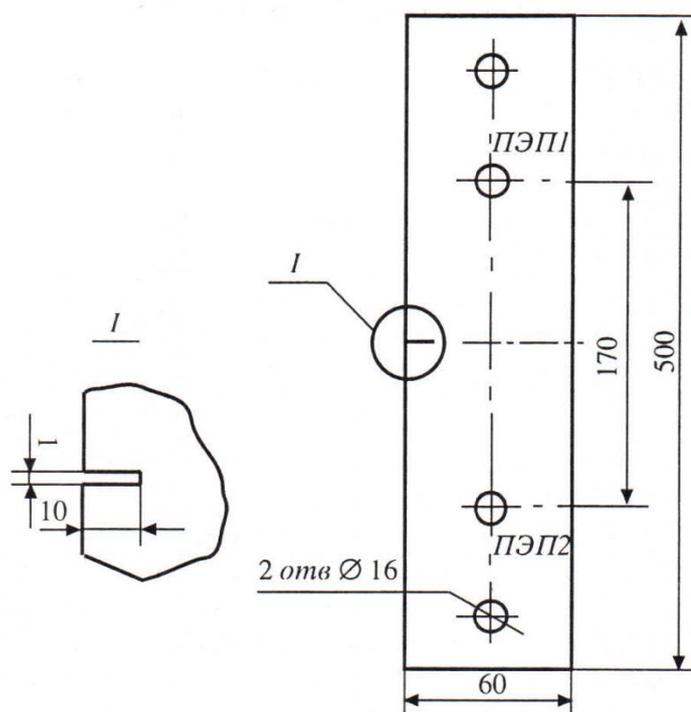


Рисунок 4.18 – Вид и геометрические размеры образцов для циклических испытаний

Основные результаты исследований АЭ при циклических испытаниях приведены в работах [230–232].

Запись АЭ информации проводили в течение всего времени нагружения объектов контроля. Одновременно с регистрацией сигналов проводили измерения нагрузки, длины усталостной трещины и числа циклов нагружения при усталостных испытаниях. Оценка длины трещины проводилась оптическим методом. Погрешность измерения составила 0,01 мм. Образцы для статических и усталостных испытаний на поверхности имели окалину, при этом часть образцов в ходе испытаний зачищалась с помощью шлифовальной машины.

АЭ контроль образцов проводили с использованием системы СЦАД 16.02, которая представляла собой измерительные платы, сопряженные с персональным компьютером типа IBM PC/AT. Функциональная схема быстродействующей системы АЭ контроля с параллельно-последовательной структурой построения и принципы реализации метода получения информации описаны в работах [3, 15].

Для регистрации сигналов были использованы широкополосные приемные преобразователи, работающие в диапазоне частот 100–700 кГц.

Исследования параметров АЭ образцов при механических испытаниях производили с помощью двух приемников сигналов, установленных на образец. Запись АЭ информации осуществлялась по двум каналам. Пороговое значение амплитуды принимаемого сигнала, подлежащего записи, установлено равным 200 мВ (для дискриминации шумов нагружения). Суммарный коэффициент усиления каждого канала составил 1 000. Регистрировались сигналы при превышении порога срабатывания хотя бы на одном из приемников сигналов АЭ.

В ходе эксперимента фиксировали нагрузку, абсолютное время срабатывания приемников для каждого зарегистрированного сигнала, амплитуду сигналов, амплитудно-частотный спектр сигнала, огибающую волнового пакета каждого сигнала.

Полученные результаты подтверждают тезис о неравномерном распределении потоковых характеристик АЭ при увеличении коэффициента интенсивности

напряжений в вершине трещины. Характерные результаты испытаний представлены на рисунке 4.19.

Счет АЭ и ее активность менялись в ходе испытания и имеют три ярко выраженных максимума: в начальный период формирования магистральной трещины у искусственного концентратора, в период перехода скорости роста трещины к постоянному увеличению (рисунок 4.19) и во время соответствующее стадии предразрушения. При этом относительная доля распределения суммарного счета АЭ во время испытания и изменение ее активности для разных образцов различались. На рисунке 4.19 изменение активности  $\dot{N}$  в разные временные интервалы испытания представлено в виде гистограммы, а изменение приращения трещины – точками.

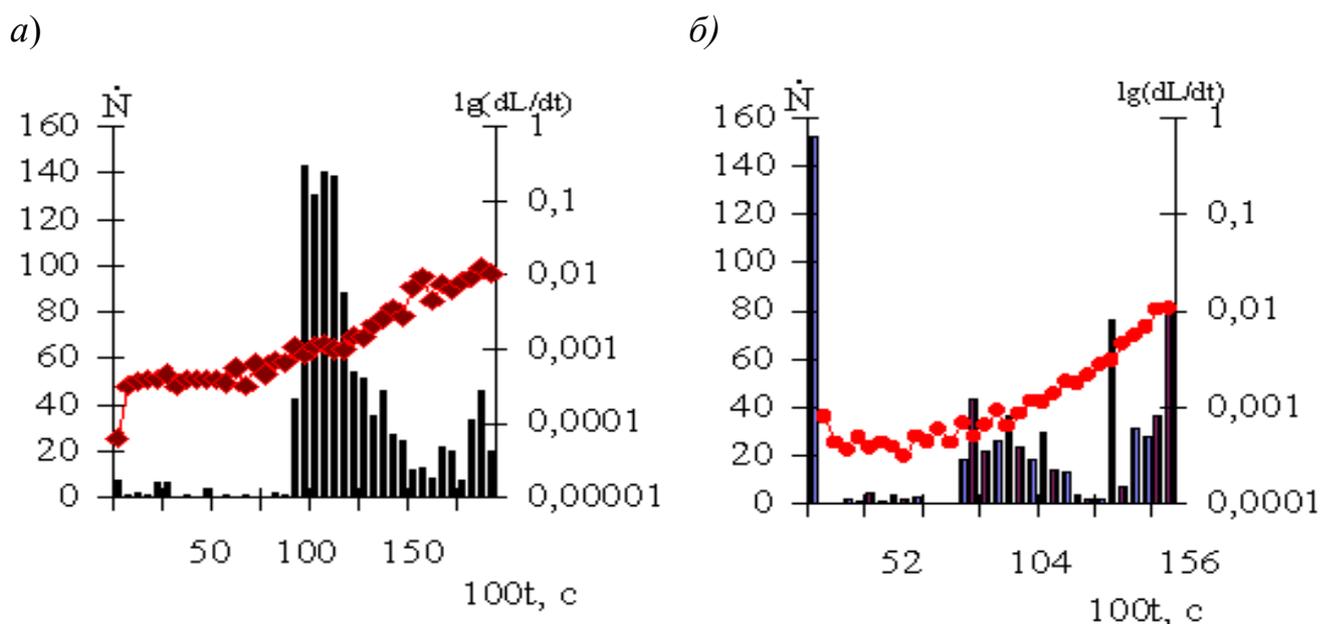


Рисунок 4.19 – Динамика изменения счета АЭ и скорости роста трещины во время циклического нагружения образцов № 1 (а) и № 2 (б) с развивающимися трещинами

Скорость роста трещины  $\frac{dl}{dt}$  определяли по формуле:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{l_i - l_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (4.8)$$

где  $l_i$  и  $l_{i-1}$  – длина трещины в каждый последующий и предыдущий интервалы времени  $t_i$  и  $t_{i-1}$  соответственно.

Таким образом, рассмотренные потоковые параметры не коррелируют с параметрами приращения трещины.

Пример приращения суммарной энергии сигналов АЭ во время испытания приведен на рисунке 4.20, *a* и принадлежит образцу № 3. В целом картина изменения суммарной энергии для всех проведенных экспериментов аналогична.

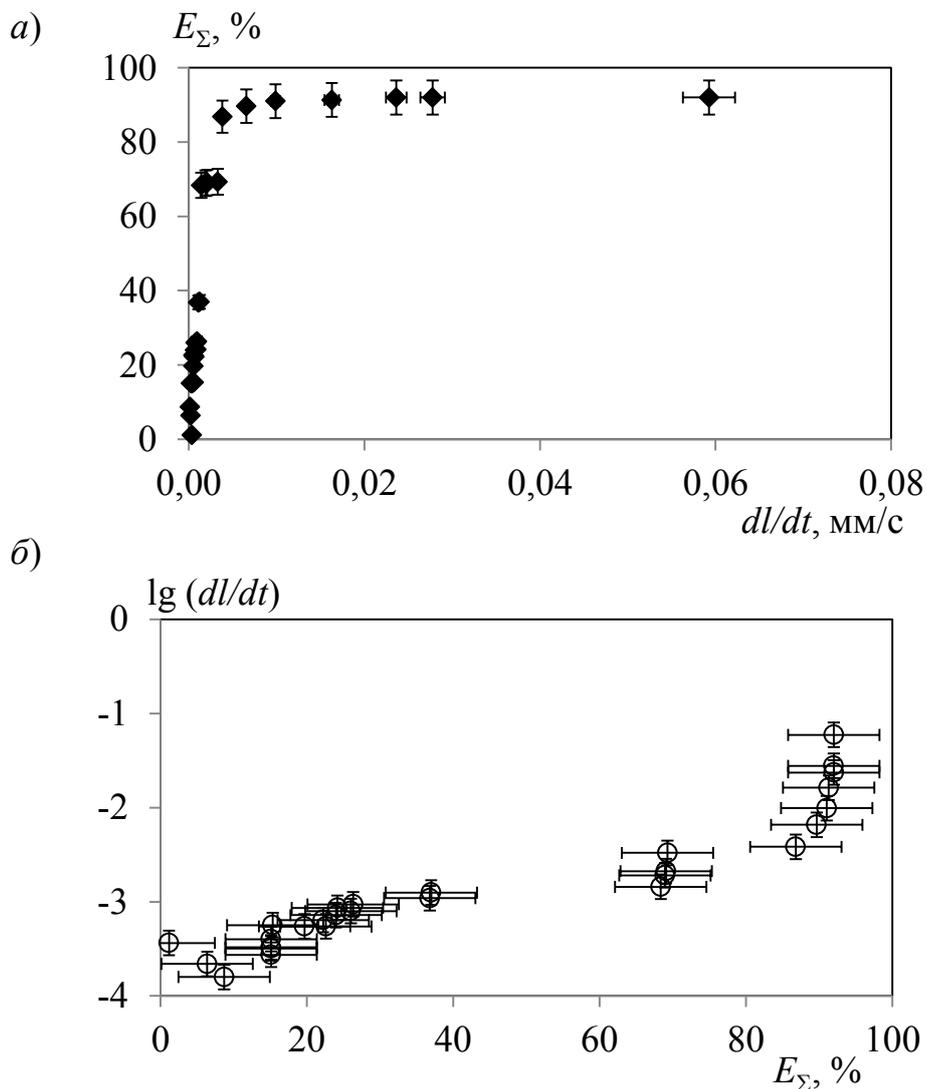


Рисунок 4.20 – Связь накопления  $E_\Sigma$  сигналов АЭ со скоростью роста трещины в линейных координатах (*a*) и логарифмическом масштабе по скорости (*б*)

Однако если представить изменение суммарной энергии сигналов АЭ от растущей трещины при циклическом нагружении в координатах  $E-\lg(dl/dt)$  (рисунок 4.20, *б*), то принципиально картина схожа с динамикой изменения кинетиче-

ской диаграммы усталостного разрушения [233] и, следовательно, демонстрирует связь суммарной энергии сигналов АЭ с коэффициентом интенсивности напряжения материала.

Подводя итоги исследованиям поведения АЭ в образцах при циклическом нагружении можно сделать следующие выводы:

- сигналы образуют несколько групп, внутри каждой группы сигналы имеют высокий коэффициент корреляции, т.е. можно предполагать, что такие сигналы сформированы едиными механизмами разрушения;

- сигналы каждой группы имеют аналоги на разных образцах, т.е. механизмы разрушения едины, несмотря на различие потоковых параметров АЭ (счет АЭ, активность, энергия, мощность);

- между некоторыми группами сигналов обнаружена связь, когда коэффициент взаимной корреляции снижается, но находится в интервале 0,4–0,7, для разных сигналов двух групп в форме волновых пакетов таких сигналов обнаружено появление дополнительных импульсов или их исчезновение, это, по всей видимости, связано с принципиальными изменениями формирования волны в источнике;

- на стадии предразрушения обнаружены характерное повышение импульсов АЭ в пределах одного волнового пакета каждого сигнала, наложение сигналов из характерных выделенных групп на стадии предварительного роста трещины показал, что стадия предразрушения представляет собой совокупность нескольких механизмов высвобождения упругой энергии в виде АЭ.

В целом, по результатам циклических испытаний образцов с пропилами до их разрушения, можно сказать, что в момент перехода линейного роста трещины к стадии нелинейного развития и на стадии предразрушения резко возрастает скорость счета сигналов АЭ. Также происходит изменение в распределении амплитудно-частотной характеристики со смещением спектра частот, несущих максимальную энергию в область частот 350...400 кГц.

Корреляционные коэффициенты  $k_{(ij)cp}$  и  $k_U$  от развивающихся трещин при циклических испытаниях ведут себя аналогично области концентратора с пластическим деформированием. Распределение сигналов по амплитудам при циклических испытаниях носит близкий к экспоненциальному распределению вид. Поэтому число сигналов с большой амплитудой (превышающих порог на 20 и более дБ) колеблется в пределах  $0...0,2$  и не имеет выраженной зависимости и только при циклах, предшествующих разрушению возрастает. С практической точки зрения это применимо только для предотвращения разрушения объекта.

#### **4.4. Влияние комплексного исследования с использованием циклического и статического нагружения на параметры сигналов акустической эмиссии**

С практической точки зрения для применения метода АЭ при диагностике объектов важно иметь представление о поведении усталостных дефектов при статических испытаниях, проводимых после циклических рабочих нагрузок.

Поэтому был поставлен эксперимент, включающий последовательно чередующуюся циклическую и статическую нагрузку на образцы из стали литых деталей подвижного состава. Испытания проводили до их полного разрушения с регистрацией АЭ информации на каждом этапе испытаний, наиболее важные результаты приведены в работах [234, 235]. Для этого были изготовлены образцы, вырезанные из опорной части буксового проема боковых рам из стали 20ГФЛ. Общая фотография одного из образцов, установленного в испытательную машину с преобразователями, представлена на рисунке 4.21.



Рисунок 4.21 – Общий вид образца в нагружающей машине во время испытаний

Образцы имели разную толщину от 8 до 12 мм и кроме искусственного концентратора напряжений реальные литейные дефекты в виде раковин, пор, пористостей и ликваций, расположенных случайным образом в объеме каждого образца.

К образцам прикладывали последовательно чередующуюся циклическую и статическую нагрузку путем растяжения. Частота колебаний тележки в движении составляет 1...10 Гц [236], поэтому при циклической нагрузке использовали значение частоты, входящее в этот диапазон 5 Гц. Число циклов варьировалось. На начальных этапах циклического нагружения оно составляло 7 500...30 000 циклов за одно испытание, после этого проводили статическое нагружение со скоростью 0,5 кН/с. Амплитудное значение растягивающей силы при циклических испытаниях составило 25 кН. Максимальное усилие статического растяжения – 30 кН (т.е. полная имитация нагрузки на деталь, превышающей динамическую нагрузку движущегося вагона, которую прикладывают при АЭ испытаниях в условиях вагоноремонтного предприятия).

Методика проведения эксперимента предусматривала последовательное циклическое и статическое нагружение образца, так как такой режим имитирует напряжения, возникающие в металле в процессе эксплуатации и периодического контроля изделий между периодами эксплуатации. Исходя из этого максимальная нагрузка статических циклов была на 25 % выше относительно амплитудного значения циклической, так как в процессе АЭ контроля максимальная нагрузка составляет также 125 % от рабочей динамической.

Статические испытания проводили после определенного числа циклов нагружения, которое изменялось от образца к образцу и в процессе нагружения каждого образца. Подобная схема позволяет имитировать реальное нагруженное состояние детали, когда остановки между пунктами освидетельствования составляют различное расстояние, что приводит к неравному количеству циклов нагружения между интервалами времени, когда детали вагонов можно контролировать. Такая методика позволяет получить наиболее обобщенные тенденции изменения параметров АЭ от развивающихся трещин на концентраторах напряжений в условиях максимально приближенных к эксплуатационным.

При росте трещины на концентраторе и при приближении к моменту разрушения число циклов между статическими испытаниями сокращали до 2 000...8 000 для того, чтобы можно было проанализировать динамику изменения параметров АЭ развитой трещины при приближении к моменту разрушения. Сигналы АЭ регистрировали системой СЦАД 16.03 на всех стадиях испытаний, как при циклическом, так и при статическом нагружении с помощью четырех приемных полосовых преобразователей, расположенных так, чтобы можно было легко отфильтровывать сигналы, не связанные с продвижением трещины. Чувствительность каналов калибровали с помощью электронного имитатора, на каждый канал поочередно подавался сигнал амплитудой 1 В в соответствии с методикой, приведенной в [237]. Приемные преобразователи без учета коэффициента усиления регистрировали сигналы максимальной амплитудой 10...20 мВ. Значение общего коэффициента усиления было равным 1 000.

Целью исследования было получение информации о том, как ведут себя параметры АЭ как при циклических, так и при статических испытаниях от концентратора с зарождающейся и развивающейся трещиной на разных ее стадиях развития.

Сначала рассмотрим результаты циклических испытаний образцов. Отметим, что с точки зрения контроля реальных объектов, для которых история развития дефектов до АЭ испытаний, как правило, неизвестны, интерес представляют только дифференциальные значения параметров, т.е. в первую очередь – активность, которую определяли по формуле

$$\dot{N}_i = \frac{N_i}{n_i}, \quad (4.9)$$

где  $N_i$  – число сигналов за интервал времени  $i$  циклического нагружения между статическими испытаниями;  $n_i$  – число циклов за интервал времени  $i$ . Полученный параметр можно назвать средней активностью за цикл в интервале наблюдения. Аналогично определяли среднюю мощность сигналов АЭ за цикл:

$$W_i = \frac{E_{\Sigma i}}{n_i}, \quad (4.10)$$

где  $E_{\Sigma i}$  – суммарная энергия сигналов АЭ за интервал времени наблюдения  $n_i$  при циклических испытаниях.

На всем протяжении испытаний на концентраторе каждого образца сформировалась и развивалась усталостная трещина, динамика приращения ширины раскрытия трещин для трех образцов различной толщины  $h$  приведена на рисунке 4.22. Приращение ширины раскрытия трещины определяли по формуле

$$\Delta b = b_{\text{изм}} - b_0,$$

где  $b_{\text{изм}}$  – измеренное значение ширины раскрытия;  $b_0$  – начальная ширина раскрытия искусственного концентратора.

Для всех образцов прослеживается следующая зависимость – с увеличением толщины образца до разрушения необходимо большее количество циклов нагружения. В то же время связи ширины раскрытия трещины с толщиной образца не обнаружено.

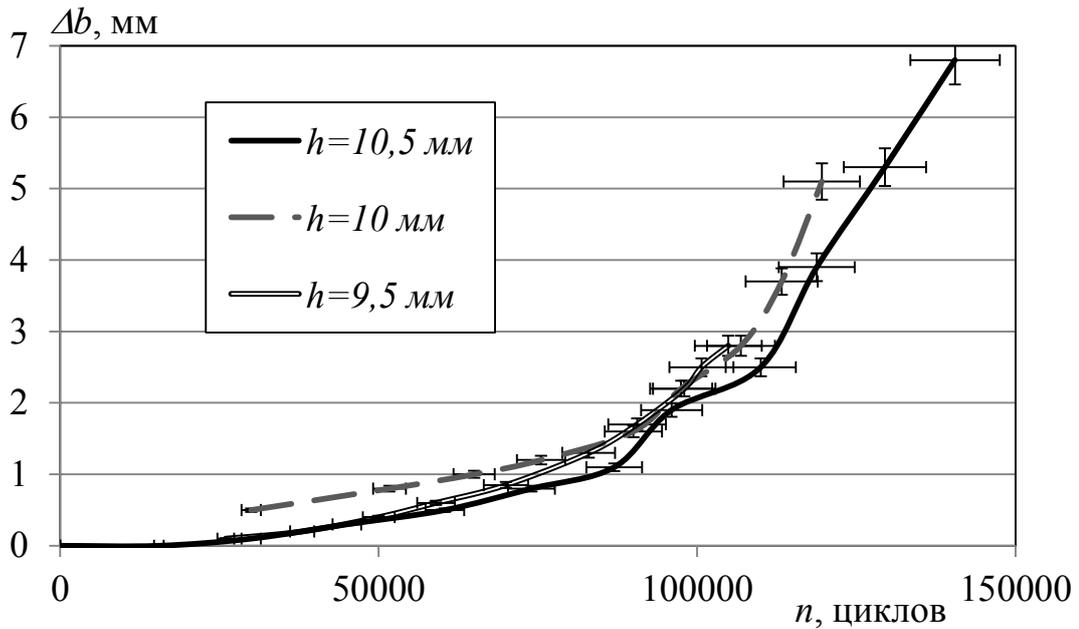


Рисунок 4.22 – Изменение ширины раскрытия трещины с увеличением числа циклов для образцов разной толщины  $h$

Сигналы от развивающейся трещины локализуются в области ее вершины с достаточно высокой точностью, что видно из рисунка 4.23, полученного на стадии циклического нагружения образца № 2.

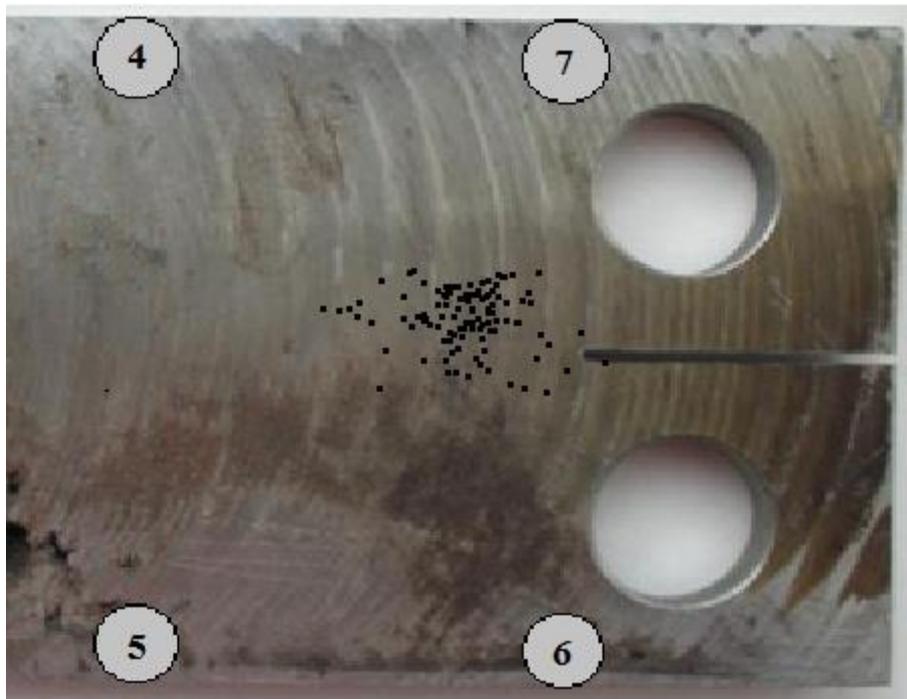


Рисунок 4.23 – Локация сигналов АЭ при развитии усталостной трещины в образце № 2 (номера обозначены места установки приемников соответствующих каналов)

При анализе результатов испытаний установили, что у всех образцов с увеличением числа циклов нагружения до определенного момента наблюдали постепенный рост активности как по числу сигналов, так и по энергии. Миновав этот пик числа циклов, в завершающей фазе развития трещины, активность сигналов АЭ и средняя энергия за цикл заметно снижаются, что видно из рисунка 4.24. Однако почти у всех образцов (четырех из шести) в определенные интервалы циклического нагружения описанная зависимость нарушается, что хорошо видно из зависимости (рисунок 4.25).

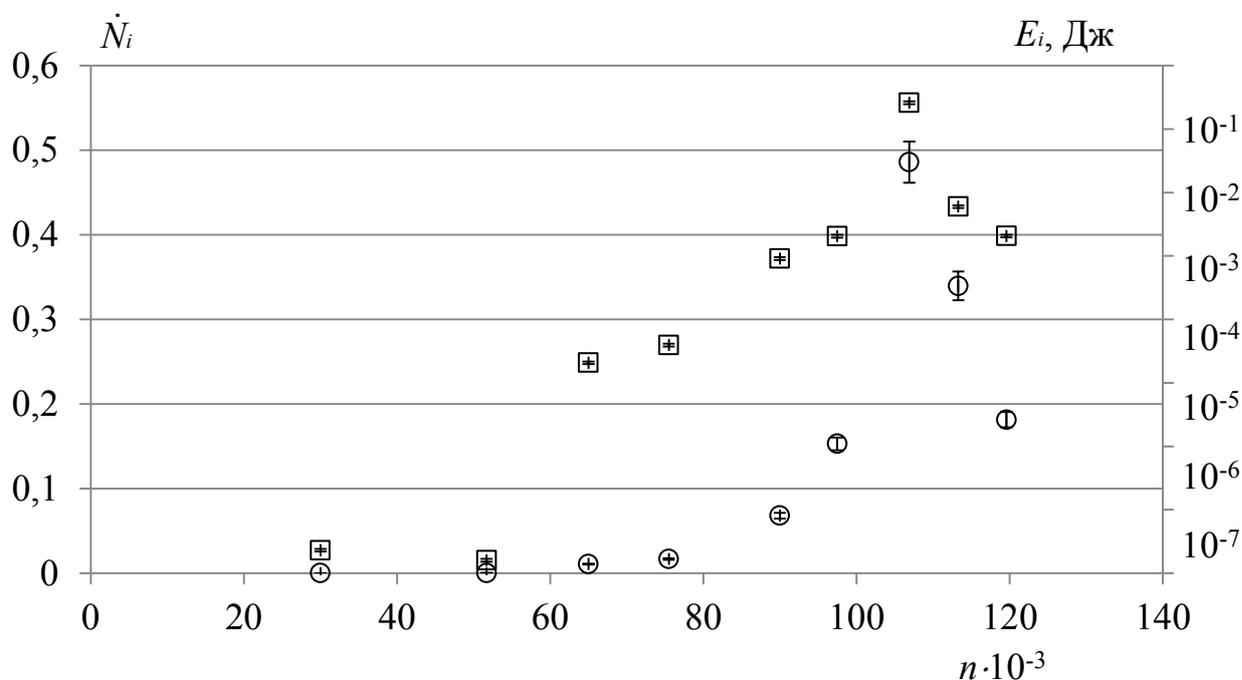


Рисунок 4.24 – Динамика изменения активности  $\dot{N}_i$  (□) и средней энергии АЭ за цикл  $E_i$  (○) при циклических испытаниях образца № 5

Нарушение тенденции к возрастанию параметров АЭ сопровождается всплесками активности и средней энергии сигналов АЭ в испытательном интервале циклических нагрузок. Анализ структурного состояния образцов, приведенный в работе [238], показывает, что такие всплески активности АЭ могут быть связаны с наличием литейных дефектов в виде нарушений сплошности и неоднородности структурного состояния, которые встречаются на пути трещины. Как следствие – в интервалы времени, когда трещина пересекает такие дефекты, ак-

тивность ее как источника возрастает, что может быть связано с дополнительными объемами металла, вовлеченными в процесс разрушения.

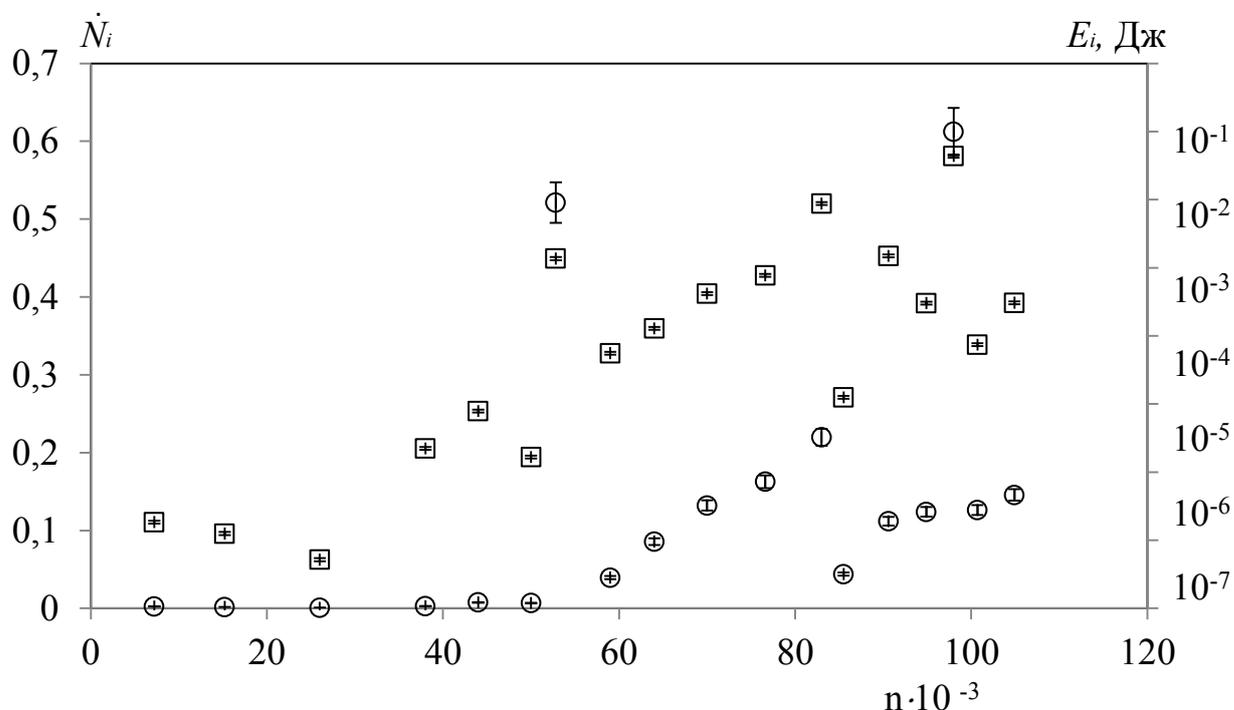


Рисунок 4.25 – Динамика изменения активности  $\dot{N}_i$  (□) и средней энергии АЭ за цикл  $E_i$  (О) при циклических испытаниях образца № 6

Последующий металлографический анализ участков излома и прилегающих к ней областей показал, что на изломах выявлены дефекты литейного происхождения, такие как белые пятна и усадочные рыхлости (рисунок 4.26, а–в).

Белые пятна обусловлены химической неоднородностью, а усадочные рыхлости – скоплением несплошностей с пористым строением. Прохождение усталостной трещиной этих участков приводит к изменению потоковых параметров АЭ. Кроме того, в образцах содержались неметаллические включения различных размеров (рисунок 4.27), наличие которых накладывает отпечаток на колебания потоковых параметров АЭ.

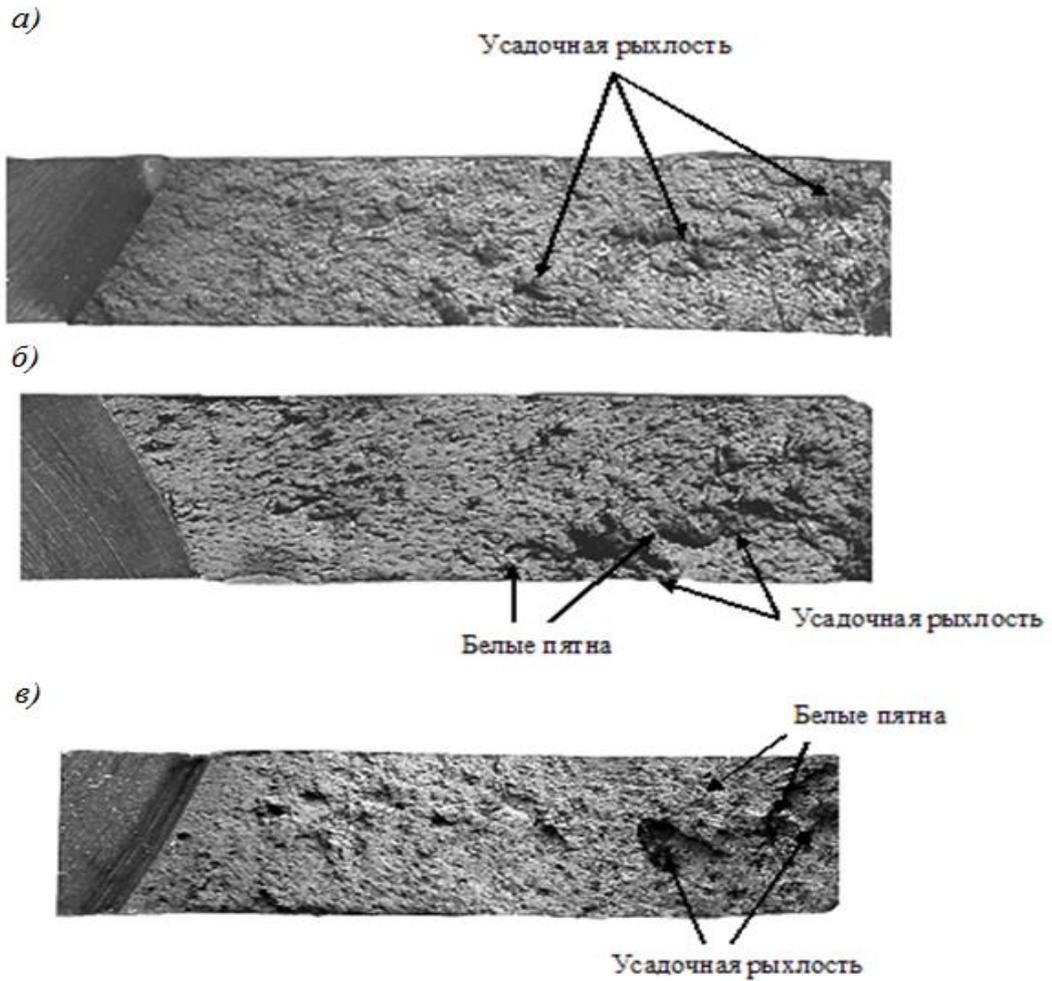


Рисунок 4.26 – Общий вид изломов образцов: *а* – образец № 1 при увеличении  $4\times$ ; *б* – образец № 4 при увеличении  $3\times$ ; *в* – образец № 6 при увеличении  $4\times$

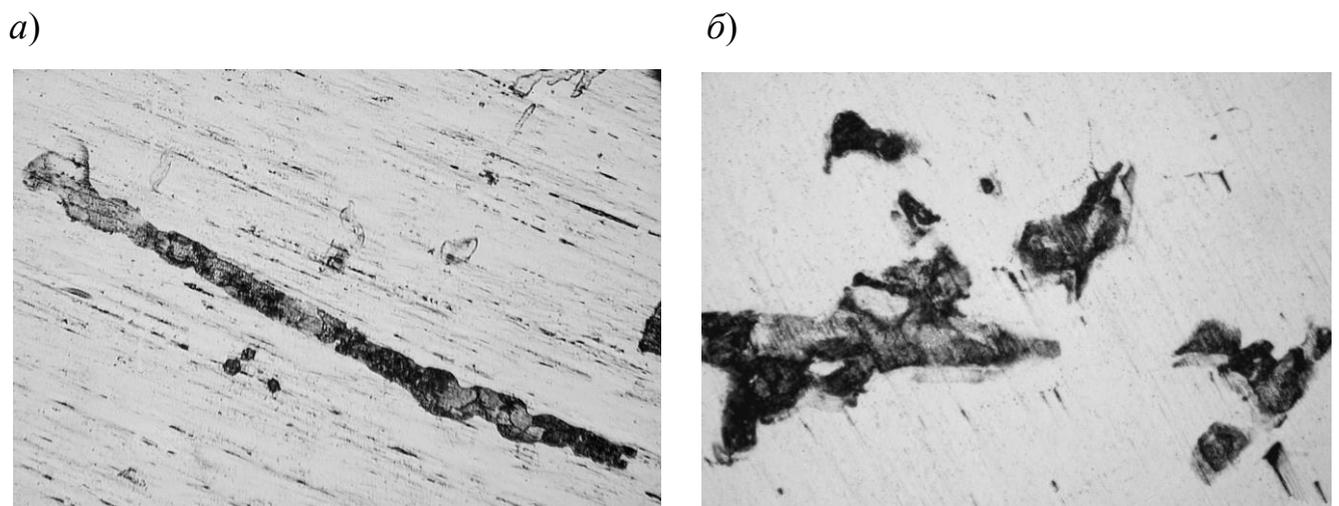


Рисунок 4.27 – Скопление хрупких силикатов в образце № 1 при увеличении  $300\times$  (*а*) и сложных силикатов в образце № 4 при увеличении  $200\times$  (*б*)

Следует отметить, что распределение сигналов по величине излученной энергии на всех этапах и для всех образцов коррелирует с активностью, но изменяется значительно сильнее, т.е. корреляция имеет квадратичную зависимость. На завершающей стадии ускоренного роста трещины наблюдается повышение уровня сигналов АЭ, несущих большие энергии, и максимальная энергия отдельных сигналов АЭ существенно превышает максимальную энергию сигналов на всех предыдущих стадиях развития трещины.

Связь же суммарного счета всех циклических испытаний с ростом трещины и увеличением ее ширины раскрытия имеет вид, представленный на рисунке 4.28. Такой вид кривой показывает связь параметров АЭ со скоростью роста трещины и коэффициентом концентрации напряжений в металле. Кривая, представленная на рисунке 4.28, имеет качественное совпадение с кривой изменения коэффициента концентрации напряжений со скоростью роста трещины [232].

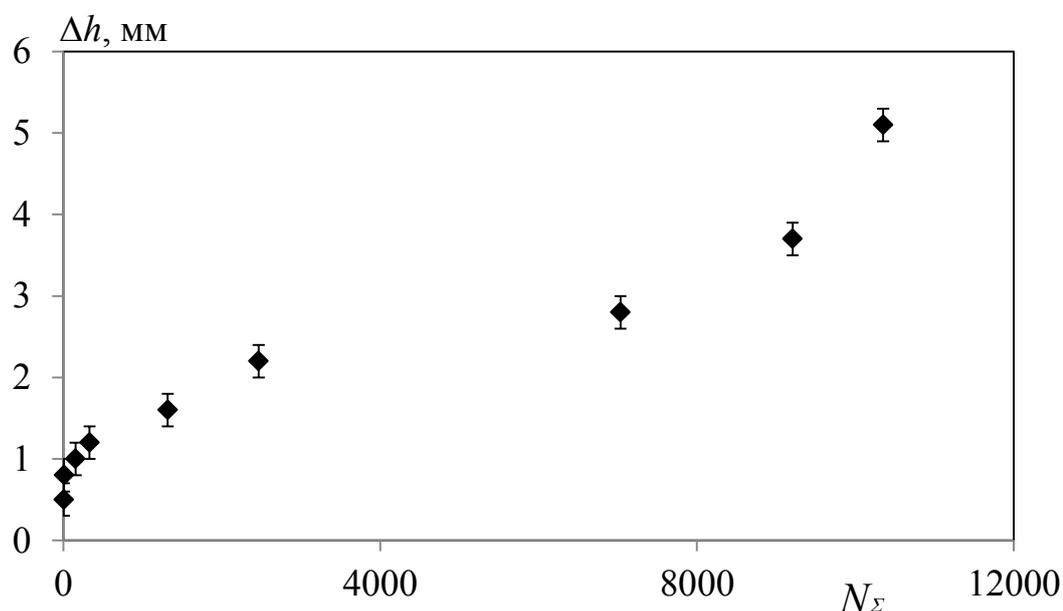


Рисунок 4.28 – Экспериментальные данные связи суммарного счета АЭ циклических испытаний с шириной раскрытия усталостной трещины  $\Delta h$

Последующий анализ результатов статических испытаний, который проводили после каждого этапа циклических нагружений, показывает, что уже на самых ранних стадиях при установленном уровне чувствительности всегда реги-

стрируются сигналы АЭ из области источника. При этом наблюдается следующая зависимость: чем большему числу циклов  $n$  при первых циклических испытаниях был подвергнут образец, тем большее число сигналов АЭ было зарегистрировано при первом статическом испытании. Как правило, до  $30 \dots 40 \cdot 10^3$  циклов суммарный счет каждого статического испытания не превышает десяти сигналов. После наработки  $60 \cdot 10^3$  циклов количество сигналов при каждом статическом испытании каждого образца превышало 100 за испытание. При этом только для одного образца наблюдали повышение и числа сигналов, и суммарной энергии на всем протяжении испытаний (рисунок 4.29). Для этого образца показатель степени для числа сигналов был близок к 1, а для энергии – 2,43.

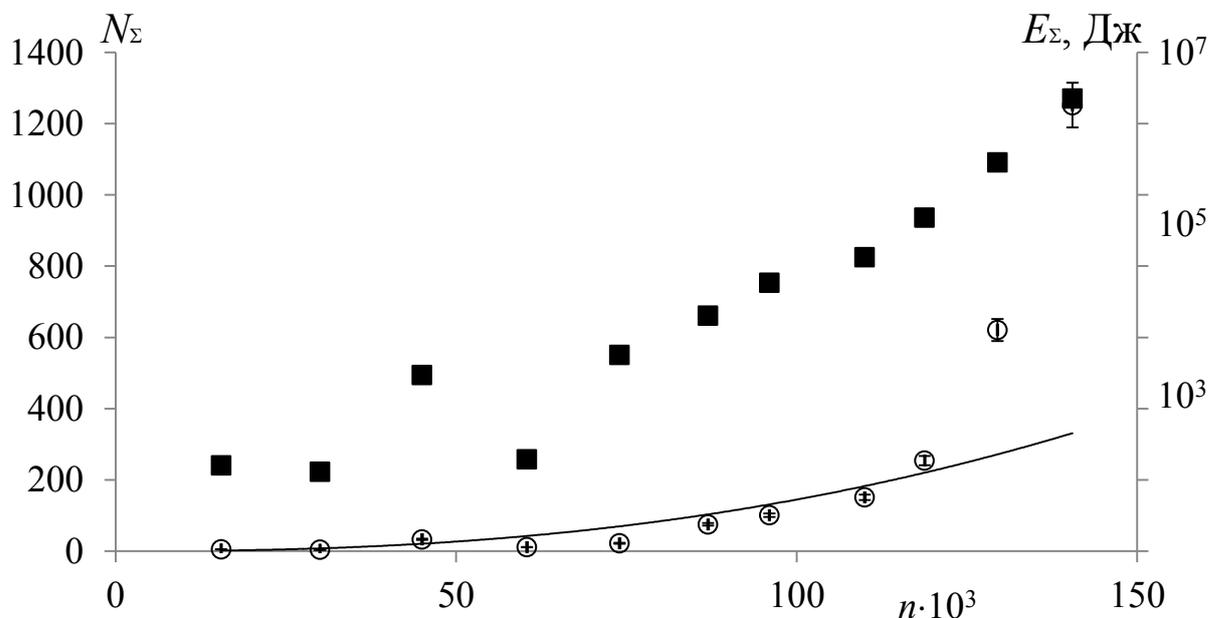


Рисунок 4.29 – Динамика изменений суммарного счета  $N_\Sigma$  (■) и суммарной энергии  $E_\Sigma$  (O) при статических испытаниях образца № 2

В целом же полученные данные показывают, что наличие концентратора с развивающейся трещиной, после циклических нагрузок, при статических испытаниях с повышенной на 20 % нагрузкой относительно циклической, позволяет уверенно регистрировать сигналы АЭ, и значения суммарного счета и суммарной энергии циклической и последующей статической стадии коррелируют между собой, что видно из рисунка 4.29. Тем не менее, разброс этих параметров у разных образцов достаточно велик на разных стадиях, что может говорить о достаточно

больших отклонениях структурного состояния литой стали 20ГФЛ. Кроме того, из разных источников [2, 3, 4] хорошо известно о нестабильности потоковых характеристик АЭ для различных объектов, изготовленных даже из одного материала.

Определение скорости развивающейся трещины приведенной к циклу  $dl/dn$  и расчет коэффициента интенсивности напряжений на каждом этапе перед статическими испытаниями показали связь этих параметров с суммарной энергией статического нагружения (рисунок 4.30), что по параметрам АЭ позволяет судить о степени развития трещин.

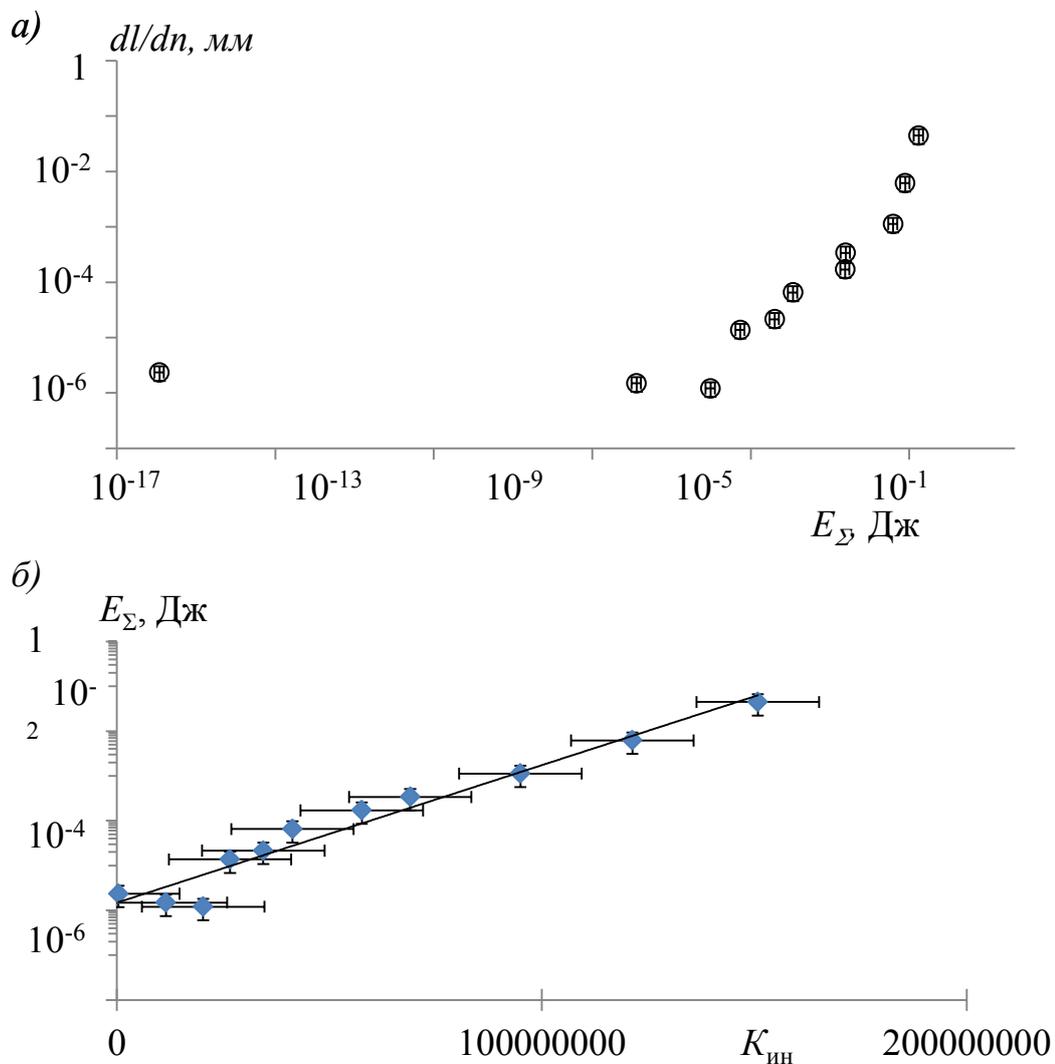


Рисунок 4.30 – Связь суммарной энергии при статических испытаниях после наработки при циклических нагрузках со скоростью роста трещины (а) и ее  $K_{ИИ}$  (б)

Последний этап исследований проводился с целью определить, на какой стадии статических испытаний приходят сигналы АЭ от развивающейся трещины. Всегда ли только при превышении амплитуды циклических нагрузок? Этот вопрос важен в свете исследований, приведенных в первой части настоящей главы.

Как видно из данных, представленных в таблице 2.4, при циклическом рабочем нагружении литых деталей тележек грузовых вагонов напряжения могут существенно превышать те, которые обеспечиваются нагружающими устройствами, рассчитанными на превышение вертикальной динамической нагрузки на 20...25 %.

Анализ времени регистрации сигналов АЭ и соответствующей им нагрузки показал, что сигналы АЭ регистрируются от источника не только при достижении напряжений, превышающих напряжения циклических испытаний, но и при нагрузках существенно меньших (пример приведен на рисунке 4.31). Даже на стадиях начала испытаний, когда усталостная трещина только сформировалась, т.е. после первого этапа циклических нагрузок в диапазоне  $(15...30) \cdot 10^3$  при первых статических испытаниях были зарегистрированы сигналы, при нагрузках в диапазоне 0,3...0,7 от максимальных.

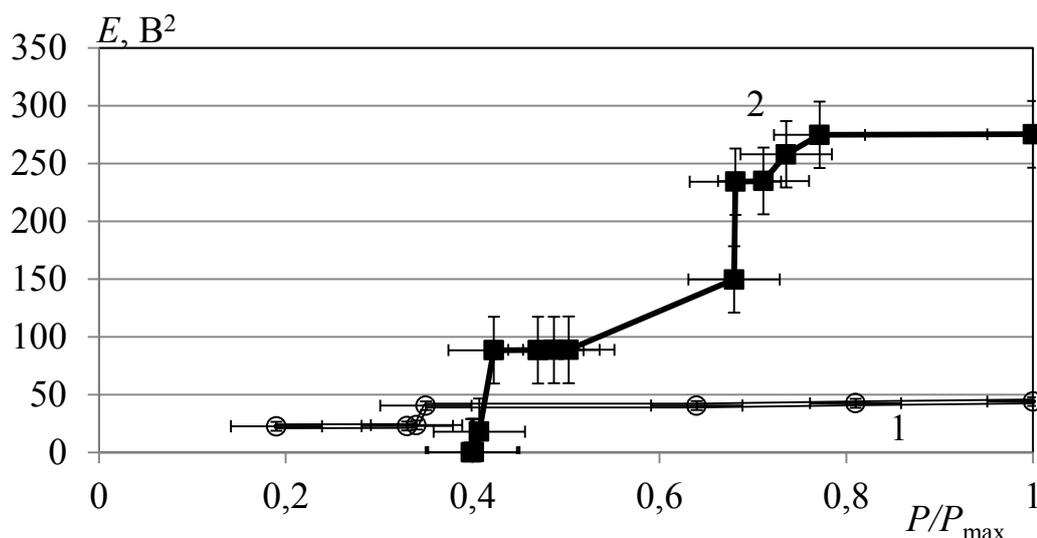


Рисунок 4.31 – Распределение накопленной энергии сигналов АЭ в зависимости от относительной нагрузки в ходе статических испытаний образца № 3 при статическом нагружении после 20 000 (1) и 30 000 (2) циклов

Анализ координат сигналов показывает, что сигналы, приходящие во время статических испытаний, до достижения нагрузок, превышающих циклические, приходят как из области всей трещины, так и из ее вершины.

Приведенные на рисунке 4.31 данные свидетельствуют о том, что:

- на стадии статических испытаний взаимодействие берегов трещины вносят достаточно большой вклад в АЭ информацию;
- при относительно небольших нагрузках в вершине развитой трещины все равно происходят необратимые процессы разрушения.

С накоплением числа циклов принципиально распределение числа сигналов от статической нагрузки не изменяется. Часть сигналов АЭ при статическом нагружении регистрируется при нагрузках от 0,3 до 0,8 от максимальной испытательной (что связано с трением берегов трещины). Такие сигналы регистрируются на всех этапах роста трещины, за исключением самой ранней стадии ее формирования, и это следует использовать для идентификации источников, в том числе когда по каким либо причинам рабочая нагрузка была выше испытательной.

Также анализировали такие параметры источника, как его площадь  $S_i$  и коэффициент концентрации  $C_i$ . На первых этапах статического нагружения концентрация источника составляла менее  $0,1 \text{ мм}^{-1}$ , а его площадь по измеренным координатам АЭ составляла до  $40 \text{ мм}^2$ . При развитии трещины ее рассчитанная по сигналам АЭ площадь немного увеличивалась, в то время как  $C_i$  возрастал значительно.

Дополнительно провели корреляционный анализ сигналов от развивающейся трещины. Как показали расчеты коэффициентов взаимной корреляции сигналов на ближайший приемник для зарождающейся трещины среднее значение  $k_{ij}$  выше 0,5 на стадии, когда ее скорость  $dl/dn$  не превышает  $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм/цикл}$ . На стадии стабильно развивающейся трещины и стадии предшествующей разрушению колеблется достаточно широком диапазоне в разные интервалы испытаний для разных образцов – от 0,3 до 0,9. Поэтому корреляционный критерий для развивающихся трещин сложно использовать для идентификации стадии их развития.

## Выводы по четвертой главе

Экспериментальные исследования потоковых параметров АЭ при растяжении в упругой области деформации показали, что активность и средняя энергия сигналов АЭ, как правило, медленно возрастает или меняется незначительно, в то время как в области пластического деформирования разброс значений этих параметров при повышении нагрузки существенно возрастает.

Кроме того, установлено, что переход деформации от упругой к пластической стадии сопровождается большим увеличением числа сигналов АЭ, вместе с тем увеличивается разброс значений энергии сигналов АЭ.

Последующие экспериментальные исследования статического нагружения образцов с концентраторами показали, что АЭ при напряжениях ниже предела выносливости материала незначительна и представляет собой случайные сигналы при перестройке отдельных локальных структур. При превышении предела выносливости низкоуглеродистой стали в области концентратора появляются регулярно регистрируемые сигналы АЭ, суммарный счет которых и суммарная энергия возрастают по степенной зависимости. При этом показатель степени степенной зависимости для суммарного счета достигает предела текучести материала и имеет значение 3,2, в то время как показатель степени для энергии достигает максимального значения, равного шести, значительно раньше. При увеличении нагрузки на область концентратора скорость роста показателей потоковой АЭ снижается вплоть до разрушения образцов.

Анализ сигналов АЭ, полученных из области концентратора на металлических образцах при их статическом растяжении, показывает, что для идентификации источников сигналов АЭ в ряде случаев целесообразно использовать коэффициент взаимной корреляции сигналов, что подтверждает результаты расчетов. Это позволяет выделять области устойчивой упругой деформации и области пластической деформации из общего потока сигналов АЭ.

Анализ характеристик сигналов АЭ позволил установить, следующие основные закономерности:

- сигналы из области упругой деформации концентратора напряжений обладают высоким коэффициентом корреляции, что говорит об идентичности локальных дискретных процессов;
- упругая деформация сопровождается ярко выраженными спектральными максимумами, которые повторяются для разных актов АЭ, в то время как при пластической деформации количество максимумов и их величина относительно друг друга существенно изменяется;
- предразрывное состояние характеризуется высокими значениями энергии АЭ, в то время как спектральная плотность меняется незначительно;
- при равномерном напряженном состоянии сечения концентратора АЭ при приближении к пределу текучести существенно уменьшается, вплоть до единичных сигналов АЭ в интервале испытательных напряжений  $1 \dots 1,25P_{\text{раб}}$ .

Наиболее энергоемкие сигналы АЭ приходили в начале испытаний во время приработки и формирования магистральной трещины и во время, предшествующее разрушению. Причем для разных образцов распределение в относительных единицах существенно различается. Основная масса сигналов АЭ имела малую энергию колебаний.

Приведенные результаты показывают, что при циклических испытаниях по потоковым характеристикам можно определить только приблизительно стадию развития трещины, но судить о ее размерах по исследованным характеристикам сигналов АЭ не представляется возможным.

В целом по результатам циклических испытаний образцов с пропилами до их разрушения можно сказать, что в момент перехода линейного роста трещины к нелинейному состоянию и на стадии предразрушения резко возрастает скорость счета сигналов АЭ, а также происходит изменение в распределении амплитудно-частотной характеристики со смещением спектра частот, несущих максимальную энергию, в область более высоких частот.

Установлено, что потоковые параметры АЭ при циклических испытаниях при развитии трещины и АЭ при статических испытаниях в интервалах времени между циклическими коррелируют между собой для низколегированной литой стали 20ГФЛ. Это обстоятельство можно использовать для оценки параметров напряженного состояния или площади развивающейся трещины с проведением статического нагружения контролируемых АЭ методом изделий из этого материала. Кроме того, стадия формирования трещины и стадия ее роста отличаются по энергии и числу сигналов АЭ и разделяются по корреляционному критерию. Однако для определения величины дефекта более надежен результат при использовании нескольких циклов испытательного нагружения.

## **ГЛАВА 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ**

При разработке методики АЭ контроля любого изделия, узла или конструкции необходимы предварительные исследования ключевых влияющих параметров контроля, выбор которых позволит обнаруживать и идентифицировать источники АЭ с максимальной достоверностью. Основные представления о значимых настраиваемых параметрах АЭ контроля изложены в работах [15, 239].

Параметры контроля целесообразно разделить на две группы: параметры аппаратуры, зависящие от возможностей и установок, реализованных в измерительной технике, применяемой для контроля, и параметры метода, определяемые в зависимости от параметров аппаратуры, свойств материала и формы диагностируемого объекта.

Для определения уровня достоверности получаемой информации определим основные настраиваемые параметры контроля:

- влияние тандема параметров: времени приема сигнала приемными преобразователями и скорости распространения волн АЭ на точность определения координат в литой детали сложной конфигурации;
- ослабление энергии АЭ волны на пути от источника до приемника по детали и факторы, искажающие этот параметр, их степень влияния на результат и методические аспекты учета этого влияния;
- геометрические параметры пьезоантенны, обеспечивающие наибольшую надежность выявления потенциально опасных источников, и методические аспекты их использования на детали сложной формы;
- оценка чувствительности АЭ контроля из экспериментальных результатов, полученных при испытании образцов.

Следует отметить, что анализ именно коэффициента ослабления сигналов, а не коэффициента затухания наиболее точно позволит оценивать чувствительность контроля, так как этот параметр учитывает как характеристики затухания, так и изменение энергии и амплитуды волны вследствие расхождения ее фронта при распространении в исследуемых объектах.

### **5.1. Анализ погрешности определения координат источников акустической эмиссии в литых деталях**

Как показывает практика АЭ контроля литых деталей сложной формы, часто возникают проблемы с точностью определения координат источников. Учитывая, что определение координат проводят путем решения системы уравнений, приведенных для плоского объекта в монографии [8], основными характеристиками, от которых зависит погрешность оценки координат, являются погрешности определения:

- координат приемников;
- скорости акустической волны;
- времени приема сигналов АЭ приемниками.

С точки зрения обработки таких сигналов повысить точность определения координат можно методом нейронных сетей, так как по сути своей сигналы дискретной АЭ являются квазистохастическими. Форму сигналов и их параметры можно использовать для корректировки параметров, влияющих на точность при вычислении. Результаты исследований вклада различных факторов, связанных с формой и структурой ОК на погрешность определения координат, изложены в работах [240–242].

Для качественной иллюстрации достаточно больших погрешностей, которые могут возникать при контроле, был выполнен эксперимент по локации источника внутри прямоугольной пьезоантенны на участке надрессорной балки размером 300×370 мм. Источником АЭ в этом случае являлся индентор в виде шарика из стали ШХ15 диаметром 3 мм, вдавливаемый в поверхность литого металла надрессорной балки. Реальная погрешность координат источника составила не более 1 % от величины контролируемой зоны. Индентор вдавливали в нескольких местах, на разном удалении источника от приемных преобразователей в течение 60 с и с последующей выдержкой также в течение 60 с. В ходе каждого эксперимента при вдавливании индентора регистрировали более 2 000 сигналов АЭ от этого источника, активность остальных источников была сведена к минимуму (менее 10 % сигналов).

Результаты локации такого источника, полученные известными аналитическими методами определения координат [8, 71], приведены на рисунке 5.1. Результат наглядно демонстрирует, что в плотном потоке разных по своей структуре и на фоне шумов разного уровня сигналов возникают достаточно сильные ошибки при расчете координат с использованием известных скорости ультразвука, координат источников и разности времени регистрации каждого сигнала разными приемниками.

Около 30 % сигналов не были локализованы, 20 % имеют абсолютную погрешность вычисленных координат более 60 мм и около 35 % – более 30 мм. Если же разность в чувствительности двух пар приемных преобразователей составляет 5...6 дБ и более, то неточность определения координат возрастает, что также подтверждено экспериментально. Причем установлено, что при определении координат по сигналам, амплитуда которых превышает пороговое значение на 20 дБ и более, точность возрастает, но этого недостаточно для того, чтобы с высокой вероятностью идентифицировать многие сигналы между собой как сигналы от одного или разных источников. Вместе с тем эта задача имеет особую актуальность в свете проведенных исследований параметров АЭ на образцах.

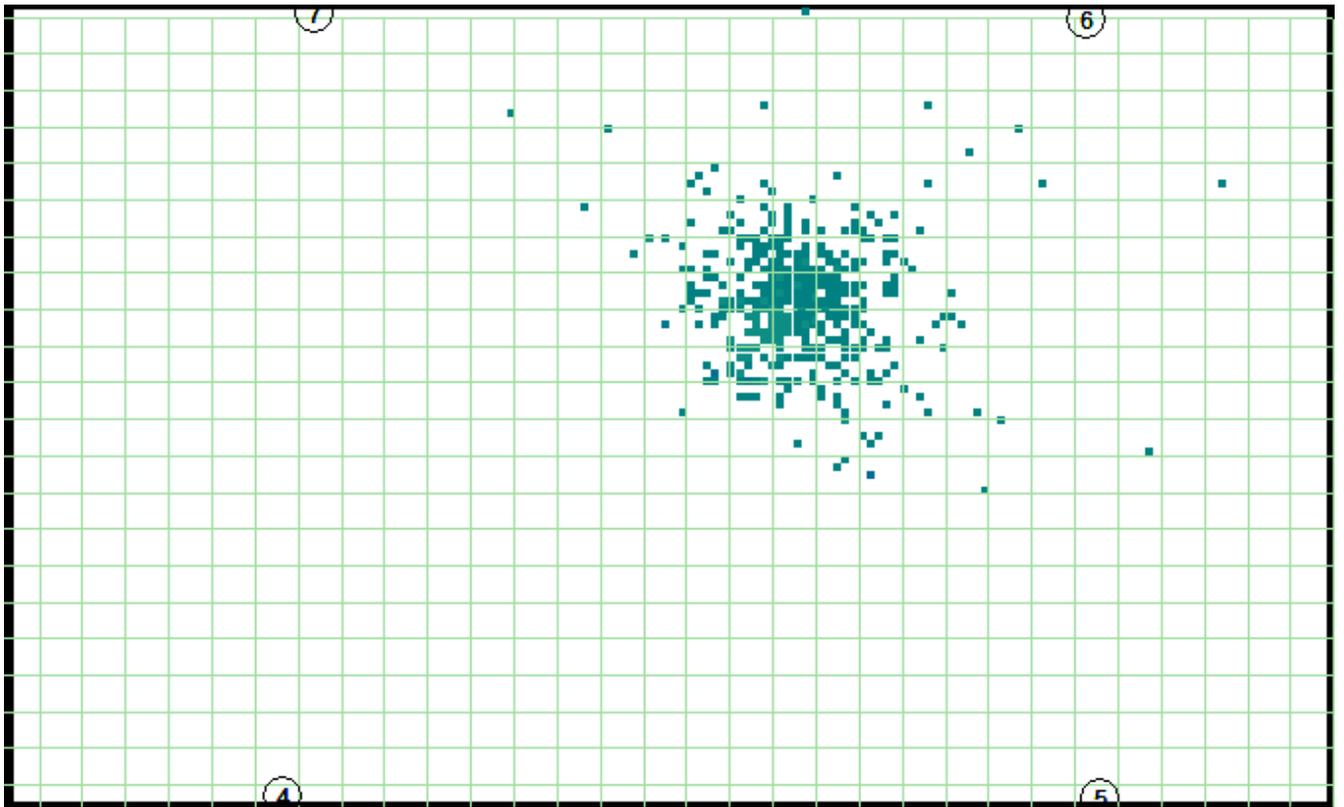


Рисунок 5.1 – Качественная картина определения координат источника АЭ в литой детали

Безусловно, основной вклад в погрешность определения координат источников, исходя из методики расчета [8, 71], вносят совокупность неточного определения времени прихода сигналов АЭ и неточное значение скорости распространения ультразвуковой волны, так как систематическая ошибка, вносимая неточностью координат приемников с точки зрения оценки положения источников друг относительно друга, сводится к нулю и нивелируется методически при их идентификации другими методами контроля.

Учитывая, что погрешность определения скорости акустической волны и времени прихода сигнала на приемный преобразователь связаны между собой для анализа погрешностей, можно акцентировать внимание на одном из этих параметров, но прежде необходимо определить, какой из них приведет к большей точности.

Поэтому сначала следует обратить внимание на волновые пакеты регистрируемых сигналов АЭ и их параметры, которые влияют на точность определения времени прихода каждого сигнала и их возможную связь со скоростью ультразву-

ка, значение которой может сильно варьироваться от пространственного расположения источника, параметров акустического тракта и затухания, что частично видно из рисунка 5.2. Кроме того, не надо забывать, что волновой пакет во многом искажается характеристиками приемного преобразователя.

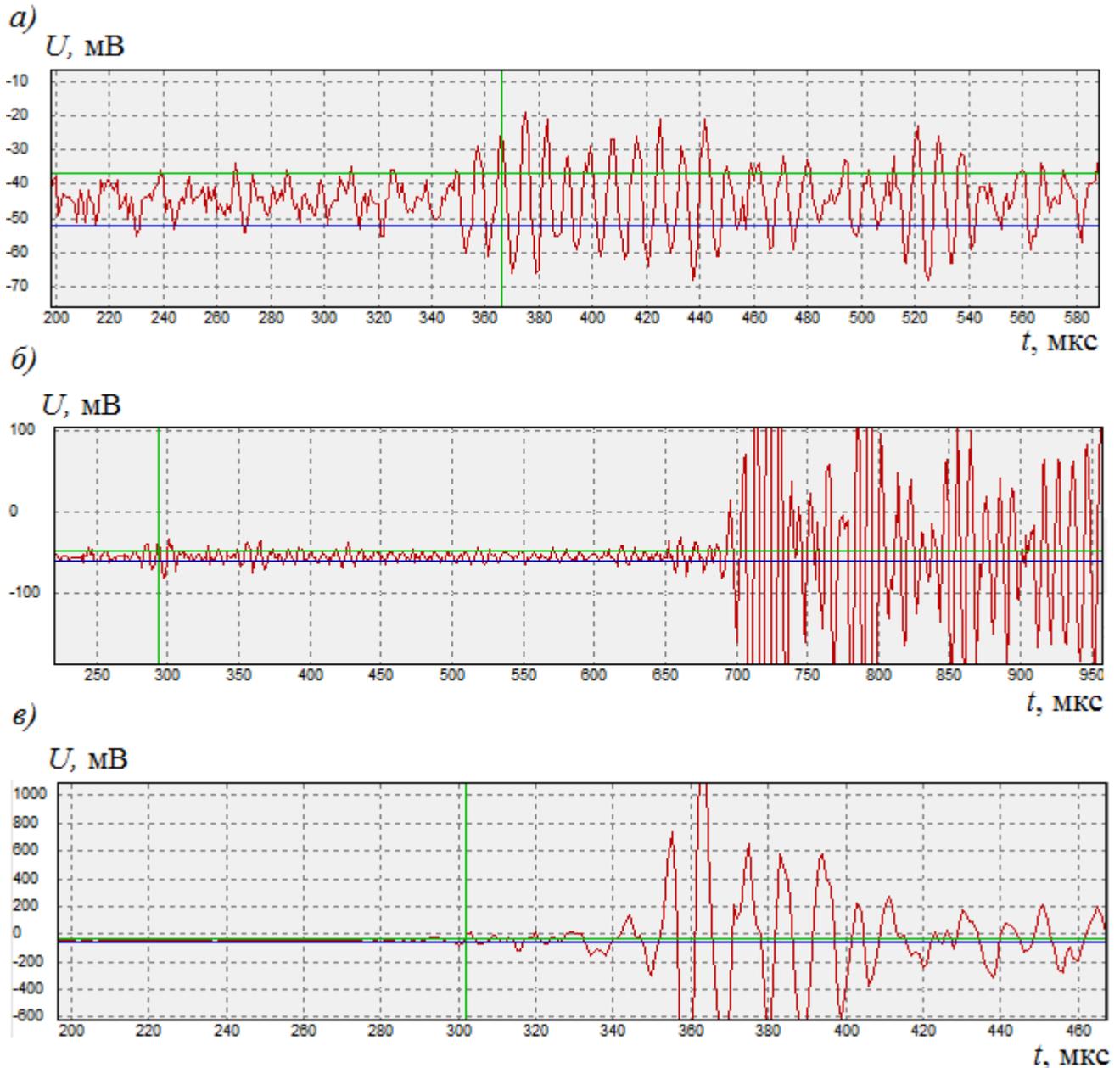


Рисунок 5.2 – Волновые пакеты сигналов АЭ от реальных источников в литой детали: *a* – сигнал относительно малой амплитудой на фоне шума; *б* – наложение двух различных сигналов; *в* – сигнал с низкоамплитудной быстрой гармоникой

На рисунке 5.2 представлены различные примеры волновых пакетов сигналов АЭ в разных масштабах, для которых время прихода определено с погрешно-

стью (что видно по вертикальной линии автоматически определенного времени прихода). Приведенные на рисунке 5.2 сигналы имеют условные названия, но с точки зрения обработки и определения двух важных параметров для расчета координат – времени начала сигнала и скорости ультразвука, причина появления таких сигналов неважна. С точки зрения обработки важна классификация этих сигналов по их измеряемым прямым и дифференциальным характеристикам.

Поэтому для повышения точности определения времени прихода таких сигналов целесообразно использовать методики корректировки времени прихода сигналов и скорости распространения, учитываемой при расчетах.

На первом этапе исследований были проанализированы изменения скорости распространения ультразвуковой волны в литых деталях тележки. Основными допущениями, используемыми в аналитическом способе расчета координат, являются два упрощения:

- координатная сетка нормирована к скорости распространения акустической волны, которая является константой и может задаваться программно;
- при оценке точности локации источника определяется относительная погрешность значений времени регистрации сигналов приемными преобразователями, без учета влияющих факторов.

Введение в расчетные формулы для определения координат источника АЭ для пьезоантенны произвольной формы на плоском объекте контроля параметра скорости распространения и его варьирование могут существенно повысить точность локации источника АЭ. Это обусловлено тем, что при аналитическом расчете координат не учитывается совместное влияние произведения времени прихода сигналов АЭ на скорость распространения волнового пакета по сложной траектории литой детали.

Как показывает практический опыт применения АЭ метода для металлических объектов контроля, волновой пакет, формируемый источником и распространяющийся в плоском объекте при прямом измерении значений скорости распространения волны с известными координатами источника относительно приемников, дает значение скорости в диапазоне 2 900...6 250 м/с, что не может счи-

таться удовлетворительным. Именно разброс этих данных может иллюстрировать погрешность произведения скорости на время приема сигналов АЭ [240, 241].

Далее провели эксперимент по прямым измерениям вычисленной с учетом реального времени начала каждого сигнала и скорости акустической волны. Таковую скорость будем называть «расчетной», считая время регистрации сигналов АЭ фиксированным, в различных объектах (сосуды, работающие под давлением, литые детали подвижного состава, оси колесных пар). Расчетная скорость имеет корреляционную зависимость от расстояния от источника АЭ до приемника (рисунок 5.3) и относительной амплитуды принятых сигналов (рисунок 5.4). Эти снижения обусловлены влиянием затухания энергии акустической волны.

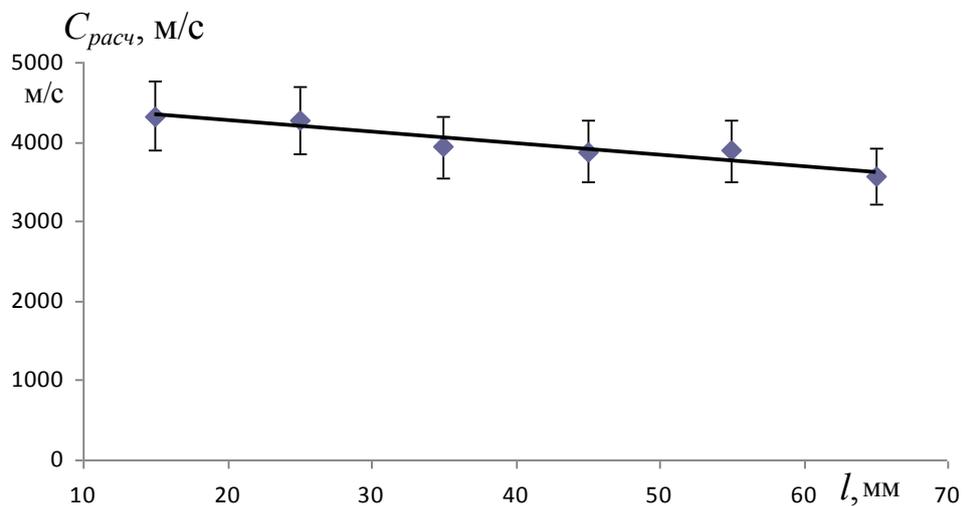


Рисунок 5.3 – Влияние расстояния от источника до приемников на среднее значение расчетной скорости акустической волны

Расчет для плоского объекта проводится по следующему алгоритму:

- на первом этапе определяются координаты источника с фиксированным усредненным значением расчетной скорости распространения для материала данного объекта контроля по данным координат и времени прихода на первые три приемника, а по дополнительному приемнику оценивается погрешность измерения времени прихода и координат источника относительно его координат;
- на втором этапе, с учетом предварительно определенных координат, корректируются значения расчетной скорости ультразвуковой волны для каждого

направления в зависимости от расстояния, относительной амплитуды принятых сигналов и находящихся на пути участков сварных швов (для объектов в виде сварных конструкций);

- затем проводится пересчет координат источника с учетом измененных расчетных скоростей и по данным дополнительного приемника оценивается погрешность;

- если погрешность определения координат уменьшается, то итерационные шаги повторяются до получения наименьшего значения погрешности, определяемой по дополнительному приемнику.

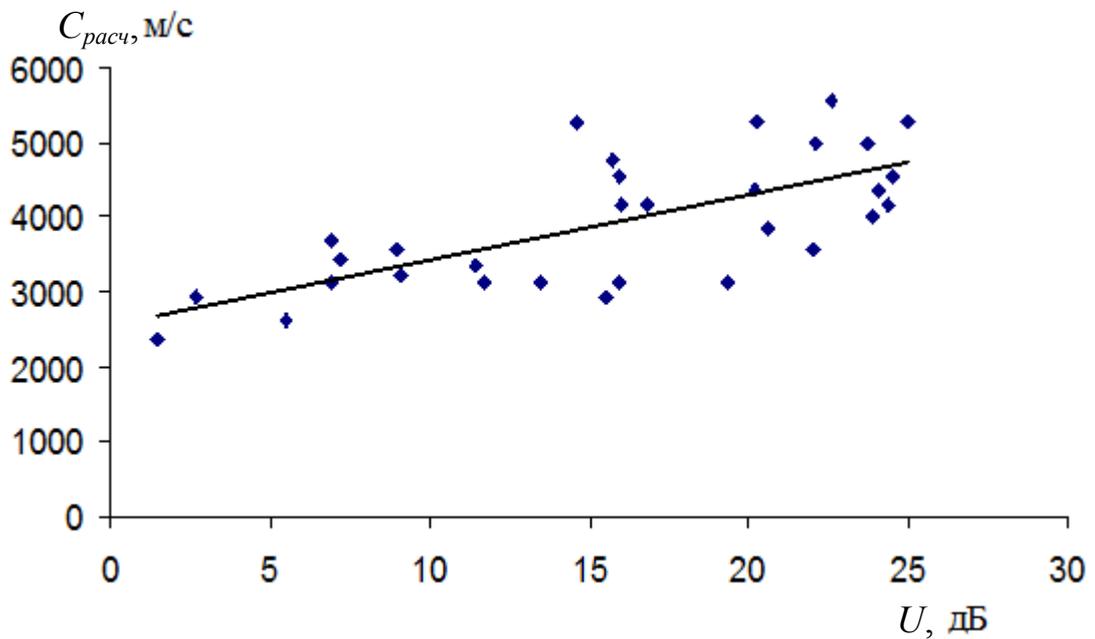


Рисунок 5.4 – Зависимость расчетной скорости ультразвука от амплитуды принятых сигналов на одинаковом расстоянии (150 мм) от источника АЭ

Кроме того, дополнительно находили зависимость погрешности определения скорости распространяемой волны от сложности формы конструкции, в частности:

- от количества изменений направления акустического тракта на пути от источника до приемника на изгибах деталей;
- от наличия участков, отремонтированных сваркой и наплавкой, и их относительной длины на акустическом тракте сигнала;

- от наличия естественных препятствий на акустическом тракте в виде внутренних литейных дефектов, различных размеров технологических отверстий в детали;
- от толщины стенки металла и ее изменения на пути акустического тракта.

Влияние перечисленных факторов сводится к изменению ослабления волнового пакета при распространении от источника до приемников. Теоретические сведения об акустике предполагают ослабление сигнала во всех перечисленных случаях [243, 244], однако насколько велико их влияние в конкретных объектах исследования целесообразно установить экспериментально.

## **5.2. Методика выбора способа определения координат источников дискретных сигналов акустической эмиссии**

Очевидно, что экспериментальные исследования изменения скорости сигналов АЭ показывают, насколько сильно влияет ослабление сигнала (вследствие затухания в материале и ширины диаграммы направленности излучения) и направленность поля излучения комбинации волновых пакетов на смещение времени регистрации сигнала преобразователем. А при использовании АЭ метода задачу оценки достоверности определения координат приходится решать для каждого источника.

В литых деталях тележек грузовых вагонов имеются практически все мешающие факторы, осложняющие определение координат источников:

- сложная форма и наличие разных технологических отверстий, искривлений формы, переходов от одной толщины стенки к другой, что приводит к существенным искажениям как несущих частот, так и амплитудного распределения регистрируемых приемными преобразователями волновых пакетов;

- сильная анизотропия физико-механических свойств и наличие внутренних несплошностей, которые приводят к увеличению дисперсии и скорости, и параметров затухания акустической волны на пути к приемникам;
- наличие нескольких моделей боковых рам и надрессорных балок, имеющих отличительные особенности геометрических размеров, в том числе толщин;
- большие допустимые значения отклонений по толщине боковой рамы и надрессорной балки в большинстве сечений этих деталей;
- достаточно существенные отклонения координат мест установки приемных преобразователей в силу наличия производственных литейных неровностей на поверхности деталей.

Существует достаточно много методов определения координат источников АЭ [1, 8, 15, 245–247]. Как показывает практика, каждый из используемых методов установления времени прихода сигналов от источников АЭ имеет ряд недостатков. При определенных обстоятельствах разные методы имеют низкую достоверность определения координат, что влечет, в конечном итоге, неадекватную оценку местоположения участков, испытывающих локальные динамические изменения структуры. Более того, исследования данных АЭ диагностики различных объектов (например, литых деталей тележек подвижного состава железных дорог, котлов цистерн, металлических элементов мостовых конструкций) [8, 15] показали, что в процессе контроля даже одного объекта, для различных типов источников различной конфигурации и размеров, наименьшую погрешность в разных случаях имеют различные методики локации.

Поэтому, для повышения достоверности определения координат источников АЭ, предложен комплексный метод локации, имеющий следующие этапы:

- запись формы сигналов АЭ, включающая изменения амплитуды на заданном интервале времени до превышения порога срабатывания;
- предварительное определение времени прихода сигналов АЭ на приемники наиболее простым методом, например, пороговым;

- оценка вероятности заданной погрешности определения времени прихода сигнала на приемник для разных методов локации, по измеренным значимым параметрам каждого сигнала АЭ;
- выбор метода определения времени прихода для каждого сигнала АЭ, имеющего максимальную вероятность заданного значения погрешности;
- локация источников по выбранным результатам.

Предложенный комплексный метод требует знания дополнительных характеристик сигналов АЭ, влияющих на погрешность определения времени прихода. К таким характеристикам относятся: максимальная амплитуда сигнала, время нарастания сигнала или его длительность, крутизна нарастания переднего фронта, максимум амплитудно-частотной характеристики и другие параметры.

Для локации источников используются два основных метода: временной [8, 15] и амплитудный [239]. Кроме того, применение временного метода сталкивается с проблемой достоверной оценки времени прихода сигнала на приемные преобразователи. В исследовательских работах [15, 246–250] встречаются следующие способы определения времени прихода сигналов АЭ:

- пороговый метод, самый простой, заключающийся в определении момента времени, когда амплитуда сигнала АЭ превысит заданное пороговое значение;
- метод с плавающим порогом, когда значение порога изменяется в ходе записи АЭ информации в зависимости от дисперсии шума, а момент прихода сигнала АЭ определяется либо по превышению порога, находящегося на уровне в  $n$  раз выше дисперсии шумов, либо по увеличению дисперсии по сравнению с предыдущим периодом в определенное значение раз;
- дисперсионный метод, основанный на последовательном сравнении перемещающихся двух сопрягающихся временных окон в интервале времени записанного по пороговому методу сигнала АЭ, в обоих окнах устанавливается дисперсия сигнала в заданном временном интервале окна и эти значения сравниваются, если дисперсия амплитуды во втором окне превышает диспер-

сию амплитуды в первом на какое-то значение, то граница окон определяется как время прихода сигнала.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства, недостатки и ограничения при локации источников АЭ. Но анализ многочисленных АЭ испытаний показывает, что в пределах одного испытания в зависимости от удаленности источников от приемников сигналов, типа источника, его ориентации в теле объекта контроля, характера АЭ (например, трение берегов трещины, продвижение трещины), для различных сигналов АЭ возможно использование одного из указанных методов. Таким образом, при АЭ испытаниях сложных объектов, с неизвестными и разнообразными типами и видами дефектов, а значит и сигналами, при развитии этих дефектов, наиболее продуктивно проводить оценку того, какой из методов определения времени прихода сигналов имеет самую высокую вероятность малой погрешности. И затем, именно этим методом определять время прихода сигнала на приемники.

Сложность поставленной задачи заключается в том, что волновые пакеты сигналов АЭ носят квазистохастический характер.

Для оценки достоверности применения каждого из указанных методов определения времени прихода сигнала АЭ наиболее целесообразно использовать теорему гипотез (формулу Байеса) [251]:

$$P(t_i|A) = \frac{P(t_i)P(A|t_i)}{P(A)} = \frac{P(t_i)P(A|t_i)}{\sum_{i=1}^n P(t_i)P(A|t_i)}, \quad (5.1)$$

где  $P(t_i)$  – вероятность события, в нашем случае момента времени прихода сигнала на  $i$ -й приемник;  $P(t_i|A)$  – вероятность момента времени прихода сигнала на приемник в зависимости от события  $A$ , которым является любой значимый параметр сигнала;  $P(A)$  – вероятность случившегося события  $A$  среди различных однотипных исходов фиксации этого параметра;  $P(A|t_i)$  – вероятность фиксации события  $A$ , в зависимости от возможного времени прихода сигналов на приемник.

В роли события  $A$  могут выступать значимые для разных методов определения времени прихода параметры, указанные, например, в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Выбор значимых параметров сигналов АЭ для оценки достоверности методов определения времени их прихода

Значимые параметры	Метод			
	Пороговый	Дисперсионный	С плавающим порогом	Кластерный
$U_{\max}$	+	+	+	–
$t_n$	+	+	+	–
$D_{\text{ш}}$	+	+	+	+
$f_{\max}$	+	+	+	+
$\Delta f$	–	–	–	+
$U_f$	+	+	+	+

$U_{\max}$  – максимальная амплитуда сигнала, дБ;  $t_n$  – время нарастания сигнала, мкс;  $D_{\text{ш}}$  – дисперсия шумов;  $f_{\max}$  – частота максимума спектральной плотности принятого сигнала;  $\Delta f$  – ширина спектра в области длительности сигнала;  $U_f$  – амплитуда сигнала в области прихода сигнала, определенная по пороговому методу, дБ.

Суммарная вероятность точности определения времени прихода одного сигнала на приемники пьезоантенны определяется по формуле

$$P(\Sigma t_i) = \prod P(t_i) . \quad (5.2)$$

Для использования данного метода влияние основных измеренных параметров сигналов АЭ на вероятность определения времени прихода с заданной погрешностью имеет универсальное распределение, например, для амплитуды это гамма-распределение. Некоторые параметры следует выбирать в зависимости от специфики излучения, типов излучаемых волн и их акустического тракта. Это ведет к введению дополнительных функций, направленных на распознавание возникающих различий, сортировку сигналов по группам различий и, в конечном счете, использованию разных моделей распределения вероятностей для этих групп сигналов АЭ.

Следует отметить, что существуют и другие способы идентификации времени начала сигналов АЭ и в принципе различных стохастических сигналов [249, 250]. Однако, учитывая специфику обрабатываемых сигналов в контексте решаемых в данной работе задач, ограничимся лишь частью методов выделения начала сигнала для получения требуемого результата.

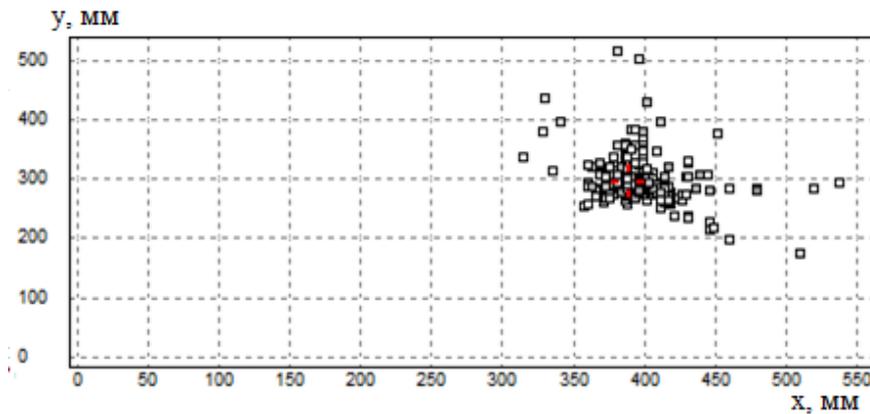
В качестве примера рассмотрим эксперимент с локацией известного источника диаметром 5 мм на нижнем поясе надрессорной балки на площади 500×500 мм, ограниченной квадратной антенной из приемников. Дифференциация координат сигналов с разными амплитудами при определении времени прихода способом фиксированного порога представлена на рисунке 5.5.

Приведенные результаты показывают, что чем меньше амплитуда сигналов, тем выше вероятность определить координаты с высокой погрешностью (рисунок 5.5, а), когда около 60 % сигналов имеет отклонение от истинной координаты более 10 % относительно стороны квадратной пьезоантенны, а 10 % сигналов отклоняется более чем на 20 %.

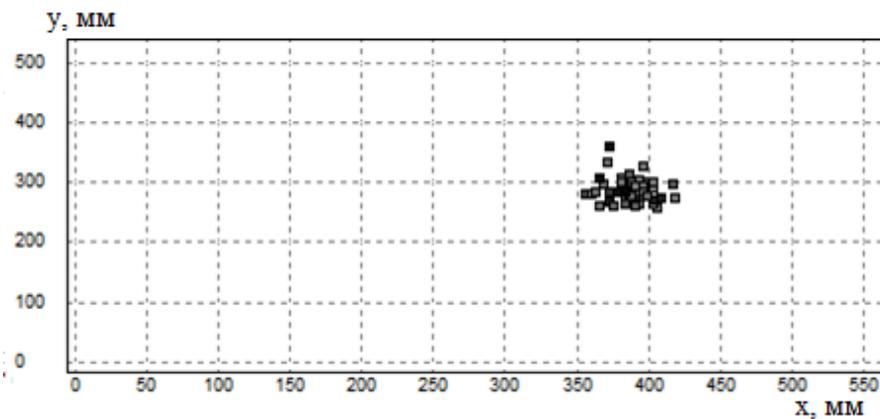
Сигналы с амплитудой, превышающей в 5...25 раз порог (рисунок 5.5, б), имеют только 9 % сигналов, выходящих за поле 10 %-й погрешности. А сигналы с амплитудой, превышающей порог более чем в 25 раз (рисунок 5.5, в), полностью сосредоточены в поле 10 %-й погрешности.

Используя формулу (5.1) для данных локализованных сигналов, приведенных на рисунке 5.5, можно оценить требуемые для расчета вероятности. Результаты определения вероятностей для формулы (5.1) для нескольких экспериментов с вдавливанием инденторов в разных точках зоны контроля сосредоточены в таблице 5.2, где  $P(\Delta r)$  – вероятность определения координат сигнала с относительной погрешностью  $\Delta r$ ;  $P(\Delta U)$  – вероятность сигнала иметь амплитуду в диапазоне  $\Delta U$ ;  $P(\Delta U|\Delta r)$  – вероятность зарегистрировать сигналы с амплитудой в диапазоне  $\Delta U$  в зависимости от погрешности  $\Delta r$ ;  $P(\Delta r|\Delta U)$  – вероятность определить координаты источника с погрешностью  $\Delta r$ , зарегистрированных с амплитудой в диапазоне  $\Delta U$ .

a)



б)



в)

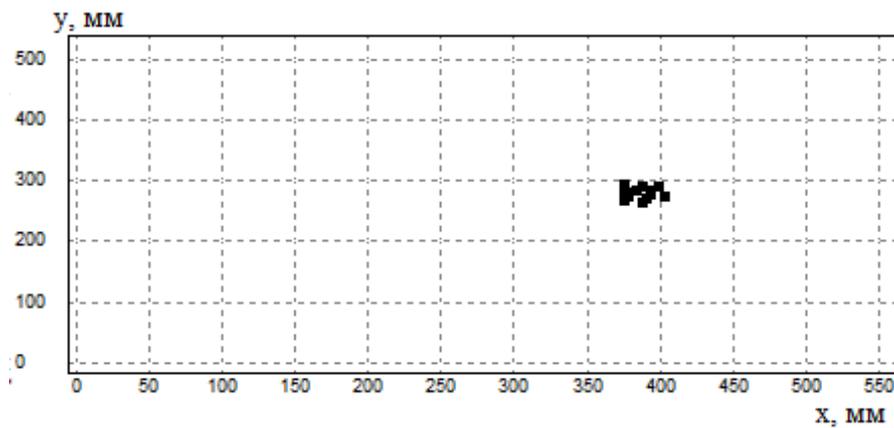


Рисунок 5.5 – Локация источника с реальными координатами (390; 280) на нижнем поясе адресной балки сигналов с амплитудой ( $N_n \dots N_n + 14$ )дБ (a); ( $N_n + 14 \dots N_n + 28$ ) дБ (б); ( $N_n + 28 \dots N_n + 40$ ) дБ (в)

Аналогичным образом определяется вероятность заданной погрешности определения координат сигналов в зависимости от времени нарастания сигналов

и других их значимых параметров. Полную вероятность для всех влияющих параметров можно оценить, используя формулу (5.2).

Таблица 5.2 – Определение вероятности для 5%-й погрешности определения координат в зависимости от амплитуды сигналов из экспериментальных данных по формуле Байеса

Диапазон амплитуд, дБ	$P(\Delta r)$	$P(\Delta U)$	$P(\Delta U \Delta r)$	$P(\Delta r \Delta U)$
$N_n \dots N_n + 14$	0,23	0,84	0,18	0,05
$N_n+14 \dots N_n + 28$	0,23	0,14	0,42	0,69
$N_n+28 \dots N_n + 40$	0,23	0,02	0,52	1,0

Например, используя в качестве влияющего параметра амплитуду и время нарастания сигнала, можно сказать, что наибольшая вероятность определения координаты с малой погрешностью присуща сигналам с большой амплитудой и временем нарастания в диапазоне 30...100 мкс. Эти данные касаются погрешности определения координат как для боковых рам, так и для надрессорных балок.

### 5.3. Анализ погрешностей определения координат при комбинированном способе обработки акустико-эмиссионной информации

На следующем этапе провели исследование вероятности определения координат с заданной погрешностью в зависимости от параметров сигналов АЭ, что позволяет использовать эти данные при реализации описанной в [251, 252] методики. Для этого использовали сигналы от источников АЭ в литых деталях (боковых рамах и надрессорных балках) и провели сортировку актов АЭ по следующим параметрам сигналов:

- максимальной амплитуде сигнала, зарегистрированного ближайшим к источнику приемником  $U_{1\max}$ ;
- отношению максимальных амплитуд сигнала принятого ближайшим к источнику приемником и двумя следующими по удаленности приемниками  $\frac{2U_{1\max}}{U_{2\max} + U_{3\max}}$ ;
- времени нарастания сигнала, зарегистрированного ближайшим к источнику приемником  $\Delta t_1$ ;
- отношению времени нарастания сигнала, зарегистрированного ближайшим к источнику приемником и двумя следующими по удаленности приемниками  $\frac{2\Delta t_1}{\Delta t_2 + \Delta t_3}$ .

Относительные параметры введены потому, что на погрешность может влиять существенная разница в чувствительности приемных преобразователей.

Выбранные параметры определяются для любого сигнала АЭ. Введение в анализ относительных величин связано с тем, что разности времени прихода между тремя первыми каналами, зарегистрировавшими акт АЭ, используются в системе уравнений при решении задачи определения координат источника. Для всех параметров была исследована вероятность относительного отклонения сигнала от истинной координаты при использовании различных методов определения момента времени начала сигнала для каждого приемника, участвующего в локации источника.

Для этого были проведены эксперименты по созданию большого потока сигналов АЭ из источника на участке литой детали. Участок представлял собой прямоугольную антенну со сторонами 370 и 300 мм. Внутри пьезоантенны были расположены источники – деформирующиеся области под воздействием шарообразного индентора диаметром 5 мм, вдавливаемого в поверхность детали силой 630 кН. Порог чувствительности каналов составил 30 мкВ, при регистрации соответствующий сигналу электронного имитатора – 30 мВ. Регистрировали и обрабатывали все сигналы АЭ, превышающие порог чувствительности.

Общая картина распределения сигналов по амплитуде и погрешности определения координат каждого зарегистрированного сигнала приведена на рисунке 5.6, где  $U_{\max}$  – максимальная амплитуда сигнала, зафиксированная ближайшим к источнику приемником,  $\Delta r$  – относительная погрешность определения координат к средней величине двух сторон прямоугольника, равная 335 мм.

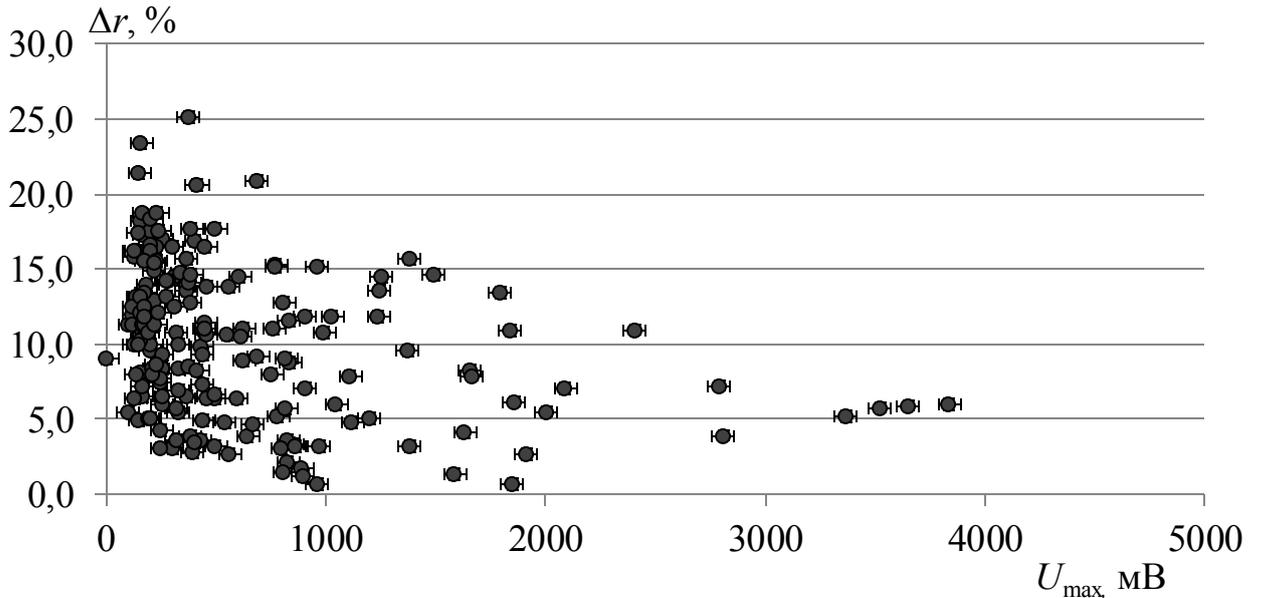


Рисунок 5.6 – Распределение сигналов АЭ по амплитуде и погрешности определения координат, полученные экспериментально на надрессорной балке при вдавливании индентора

Зависимость вероятности определения координат с погрешностью  $dr$  с учетом максимальной амплитуды зарегистрированных сигналов представлена на рисунке 5.7. При этом погрешность определения координат  $dr$  вычисляли по формуле

$$dr = \frac{2\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}}{(x + y)} \cdot 100 \%, \quad (5.3)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты источника, вычисленные для  $i$ -го сигнала аналитическим методом [8] с учетом времени прихода вычисленных одним из используемых способов;  $x_0$  и  $y_0$  – истинные координаты источника АЭ;  $x$  и  $y$  – размеры сторон прямоугольной пьезоантенны.

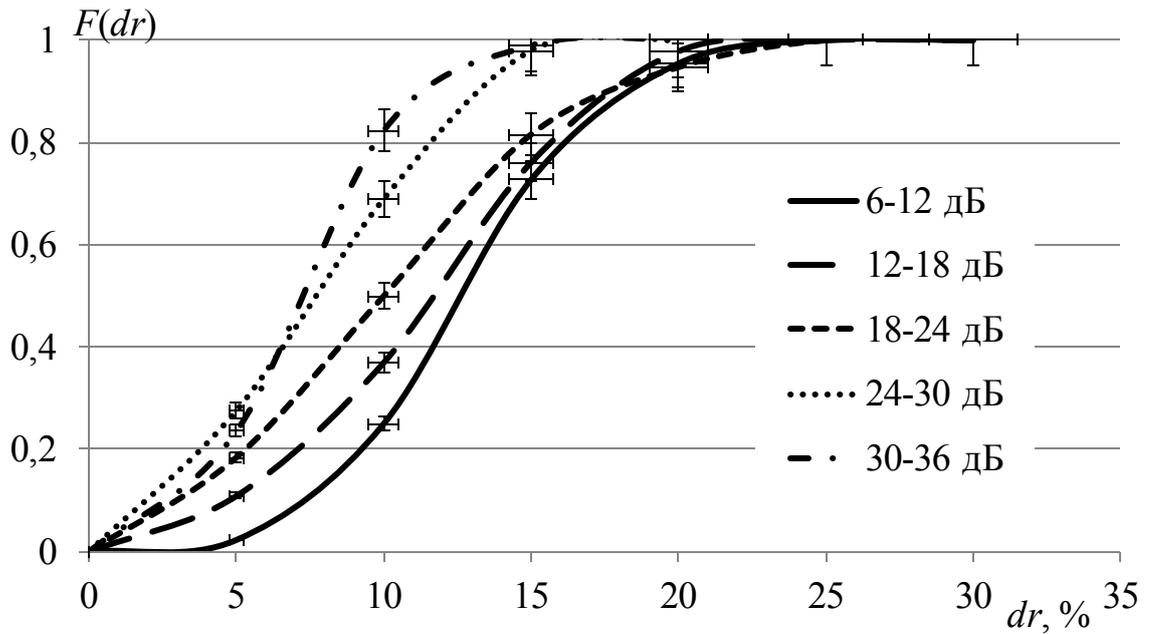


Рисунок 5.7 – Изменение вероятности определения координат источника с погрешностью  $dr$  для сигналов с различным уровнем их максимальной амплитуды при определении времени прихода пороговым методом

Полученные результаты отражают регистрацию времени прихода сигнала на каналы пороговым методом и показывают, что высокоамплитудные сигналы АЭ регистрируются с более высокой точностью, что подтверждается современными теоретическими представлениями в акустике.

Причем приведенная зависимость вероятности определения координаты источника с относительной погрешностью характеризуется во всех случаях при прочих равных условиях: разной чувствительностью преобразователей, разным размером антенны, относительным порогом чувствительности, приведенным к уровню шума, местоположением источника в зоне контроля.

При использовании для определения координат метода с плавающим порогом (относительно уровня шумов) показано, что существенно повышается точность определения координат дисперсионным методом и методом с плавающим порогом для относительно низкоамплитудных сигналов АЭ. Сравнение этих методов для сигналов, амплитуды которых превышают порог в диапазоне 6–12 дБ, приведены на рисунке 5.8.



Рисунок 5.8 – Динамика изменения вероятности определения координат источника с погрешностью  $dr$  для сигналов с амплитудой 6–12 дБ относительно пороговой при определении времени прихода разными методами

При анализе фиксированный порог устанавливали +26 дБ относительно среднеквадратического отклонения (СКО) собственных шумов приемных преобразователей. Плавающий порог устанавливали 14 дБ относительно СКО уровня шумов в интервале 0,5 мс в соответствии с формулой

$$u_{\text{пп}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{1000} (u_i - u_{\text{ср}})^2}{1000}}, \quad (5.4)$$

где  $n = 1\,000$  – число обрабатываемых значений, полученных с дискретностью 0,5 мкс;  $u_i$  – переменные значения.

При оценке времени прихода двухинтервальным методом значение времени определяли как момент, когда дисперсия значений амплитуды в интервале 32 мкс достигала  $1/3$  от максимального значения дисперсии сигнала в окрестности максимума амплитуды в таком же интервале. Значения параметров дисперсионного метода были установлены экспериментальным путем, как имеющие наименьшую погрешность при варьировании этих параметров для одних и тех же сигналов АЭ. В этом случае для эксперимента были отобраны 200 сигналов с разной формой, длительностью, максимальной амплитудой, временем нарастания и спектральной составляющей.

Как видно из сравнительных данных, вероятность попадания сигнала с амплитудой 6–12 дБ в область с погрешностью  $dr$  (см. рисунок 5.8) наиболее точным является метод с плавающим порогом.

Однако при увеличении амплитуд сигналов разница между вероятностями погрешности, определенная разными методами, выравнивается. Таким образом, для сигналов с небольшими амплитудами, зарегистрированными первым приемным преобразователем, целесообразно использовать метод определения координат с плавающим порогом. При максимальных амплитудах сигналов более 18 дБ проще использовать пороговый метод, так как для обработки информации требуется меньше ресурсов.

Аналогичной обработке результатов подвергли сигналы АЭ в зависимости от отношения амплитуд сигнала, зарегистрированных разными приемниками  $\frac{2U_{1\max}}{U_{2\max}+U_{3\max}}$ , где  $U_{i\max}$  – максимум амплитуды сигнала, принятого  $i$ -м по времени приемником, время прихода на который используется для расчета координат источника.

Обработка данных показала, что существенные различия в погрешности определения координат (для разных методов определения времени прихода сигнала на приемники) отличаются мало и для всех методов заметно возрастают при увеличении параметра  $\frac{2U_{1\max}}{U_{2\max}+U_{3\max}}$ .

На следующем этапе исследований было проанализировано влияние времени и скорости нарастания сигналов АЭ на погрешность определения координат. Данные для вероятности определения координат с погрешностью  $dr$  для метода с плавающим порогом при времени нарастания сигнала в диапазоне 0...100 мкс приведены на рисунке 5.9. Приведенные данные характерны для сигналов, регистрируемых из центральной части.

Приведенные данные показывают, что метод с плавающим порогом с относительно высокой точностью определяет координаты источника в средней части пьезоантенны при времени нарастания сигналов на первый приемный датчик до 60 мкс. При повышении времени этот метод, как и пороговый, имеет высокую по-

грешность. При увеличении времени нарастания сигналов свыше 100 мкс погрешность существенно возрастает и использование этих методов нецелесообразно.

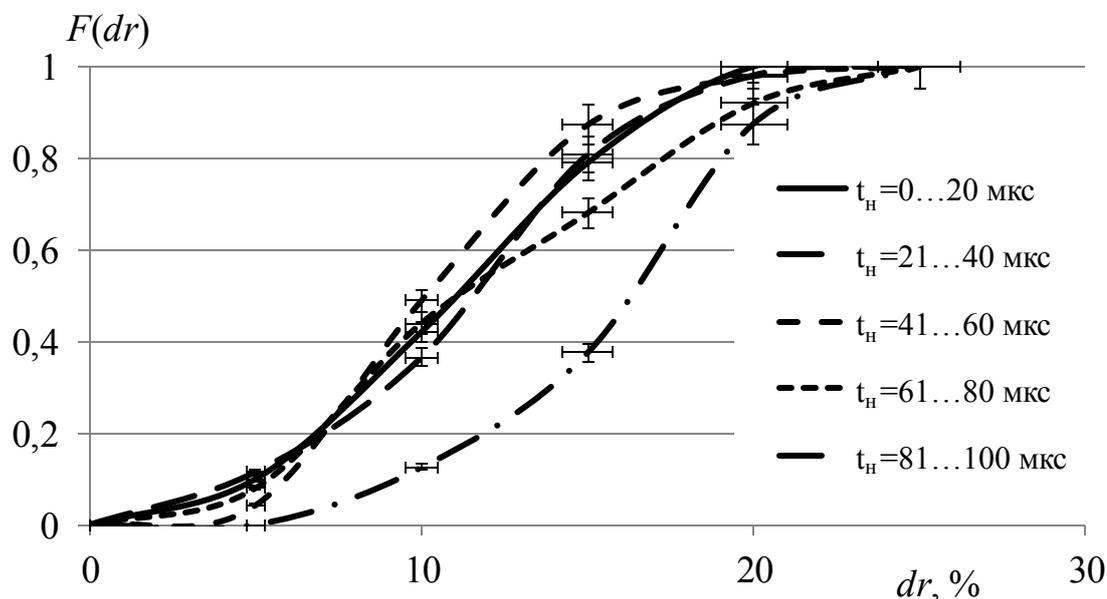


Рисунок 5.9 – Изменение вероятности определения координат источника с погрешностью  $dr$  для сигналов с различным временем нарастания сигналов при определении времени прихода методом с плавающим порогом

Для сигналов с большим временем нарастания, с высокой вероятностью  $F(dr)$  местоположение источника определяет дисперсионный метод. Результаты обработки сравнительных данных разными методами для сигналов с большим временем нарастания сигналов приведены на рисунке 5.10.

Аналогичные исследования были проведены с комплексным параметром для времени нарастания сигналов, пришедших на три приемных преобразователя, ближайших к источнику –  $\frac{2\Delta t_1}{\Delta t_2 + \Delta t_3}$ . Полученные экспериментальные данные и расчеты показали, что этот параметр менее чувствителен для оценки координат источника, когда он слишком большой (более пяти) или слишком мал (менее 0,3). Вероятность большой ошибки при определении координат источника сильно возрастает.

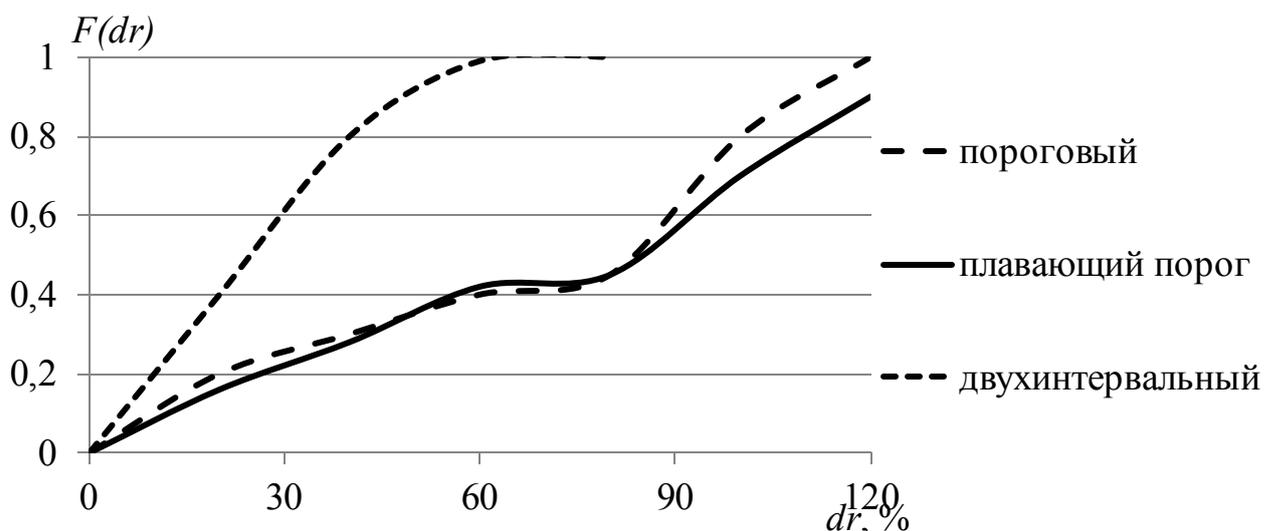


Рисунок 5.10 – Изменение вероятности определения координат источника с погрешностью  $dr$  для сигналов с временем нарастания более 100 при определении времени прихода разными методами

Полученные результаты расчета вероятностей определения координат источника с заданной погрешностью можно свести в таблицы для каждого способа определения времени прихода сигналов. Пример рассчитанных значений вероятности определения координат с точностью не менее 10 % в прямоугольной пьезоантенне, установленной на надрессорной балке, параметры которой приведены на рисунке 5.11, для способа с плавающим порогом приведен в таблице 5.3. Анализ проводили по 247 локализованным сигналам от источника – вдавливаемого в поверхность детали индентора диаметром 4 мм.

Рассчитав, таким образом, вероятности для разных способов определения времени прихода сигналов АЭ, можно выделить наиболее надежный из них для сигналов с известными параметрами (в нашем случае – максимальной амплитуды и времени нарастания первого принявшего сигнал приемника) с заданной погрешностью определения координат. Картина наиболее достоверных способов определения координат источников АЭ с погрешностью не более 10 % на литой детали с учетом координат приемников приведена на рисунке 5.12. Полученное поле позволяет на основании зарегистрированных максимальной амплитуды сигналов АЭ и их времени нарастания определять наиболее достоверный способ оценки времен прихода.

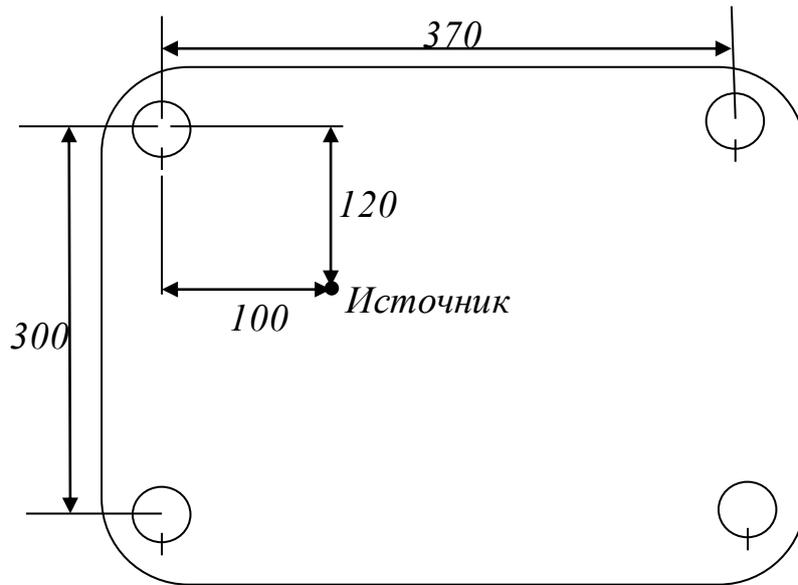


Рисунок 5.11 – Схема расположения приемников и источника АЭ на элементе надрессорной балки при оценке погрешности определения координат источника различными способами определения времени прихода сигналов на приемники

Таблица 5.3 – Распределение вероятностей определения координат источника с погрешностью не более 10 % способом с плавающим порогом в зависимости от величины амплитуды и времени нарастания сигналов

Диапазон времени нарастания сигнала, мкс	Диапазон амплитуд сигналов относительно порогового уровня, дБ				
	6...12	12...18	18...24	24...30	30...36
0...20	0,38	0,4	0,5	0,5	0
21...40	0,22	0,5	0,67	0,4	0
41...60	0,14	0,3	0,42	0,5	0,57
61...80	0	0,41	0,57	0,5	0,75
80...100	0	0,33	0,5	0,5	0
100...120	0,11	0,2	0,5	0,5	0

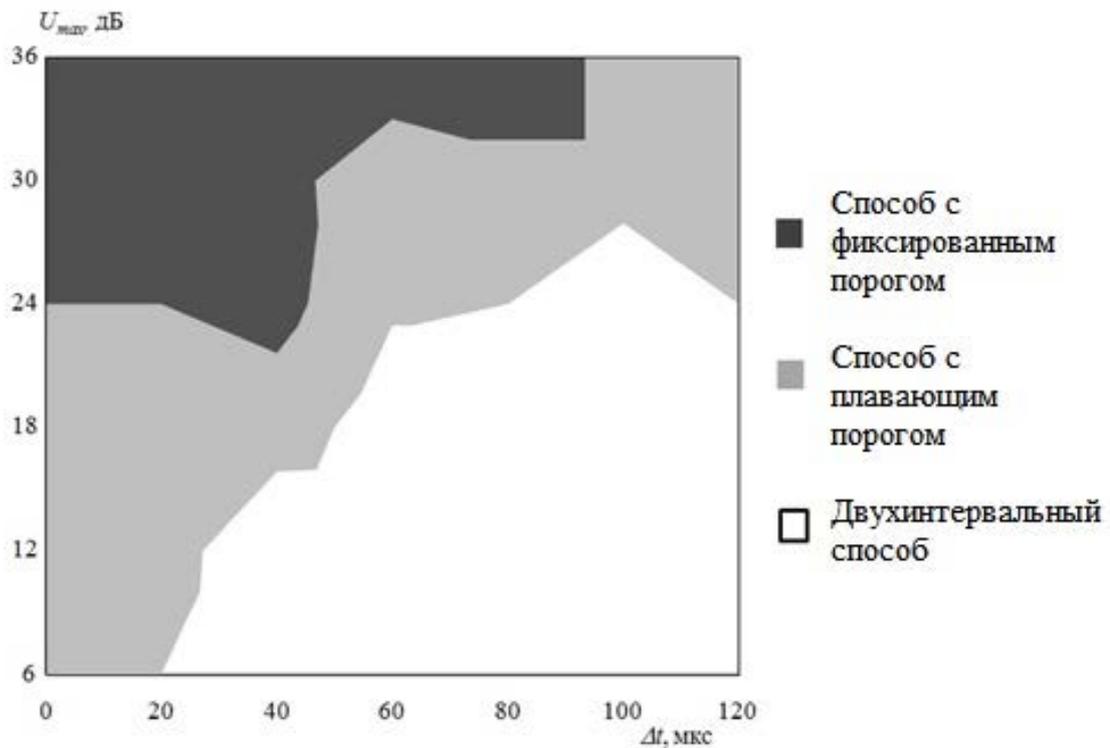


Рисунок 5.12 – Поле выбора способов оценки времени прихода сигналов АЭ для определения координат с погрешностью не более 10 % в зависимости от их амплитуды  $U_{max}$  и времени нарастания  $\Delta t$

В целом следует отметить, что вероятностная оценка достоверности определения координат зависит не только от максимальной амплитуды и времени нарастания, но может быть связана и с другими параметрами сигналов АЭ.

Проведенные исследования показывают, что в зависимости от параметров сигналов АЭ, полученных в конкретной разновидности объекта, можно с заданной вероятностью определить значение погрешности определения координат источников. Также можно с заданной погрешностью определения координат источников АЭ давать вероятностную оценку этой погрешности. Кроме того, приведенная модель позволяет выбирать наиболее оптимальный способ определения времени прихода сигналов АЭ от одного акта на приемники с наиболее высокой вероятностной оценкой погрешности координат.

Данная методика оценки достоверности определения координат источника АЭ имеет перспективы в возможности привлечения других параметров сигналов для оценки уровня погрешности, а также в развитии способов определения исходных параметров для расчета координат источника – времени прихода сигналов

АЭ на преобразователи, скорости распространения акустической волны и ее дисперсии.

На следующем этапе исследовали влияние скорости нарастания переднего фронта на точность определения координат. Следует отметить, что скорость нарастания можно определять традиционным способом как отношение максимальной амплитуды  $U_{max}$  к времени нарастания сигнала  $t_H$ :

$$V_H = \frac{U_{max}}{t_H}, \quad (5.5)$$

а можно и более сложным способом. Например, при обработке можно получить график динамического изменения скорости нарастания огибающей сигнала. Для этого сначала строится огибающая сигнала по максимуму колебаний, а динамическая скорость нарастания определяется из выражения

$$dV_H = \frac{\Delta U_{max}}{\Delta t_H}. \quad (5.6)$$

Из таких расчетов можно определить наиболее крутой участок скорости нарастания – максимум динамической скорости нарастания сигнала. Этот параметр позволяет ко времени регистрации сигнала приемником любым из перечисленных методов добавлять дополнительное значение времени регистрации сигнала  $t_2$ , обозначенное на рисунке 5.13 индексом 2.

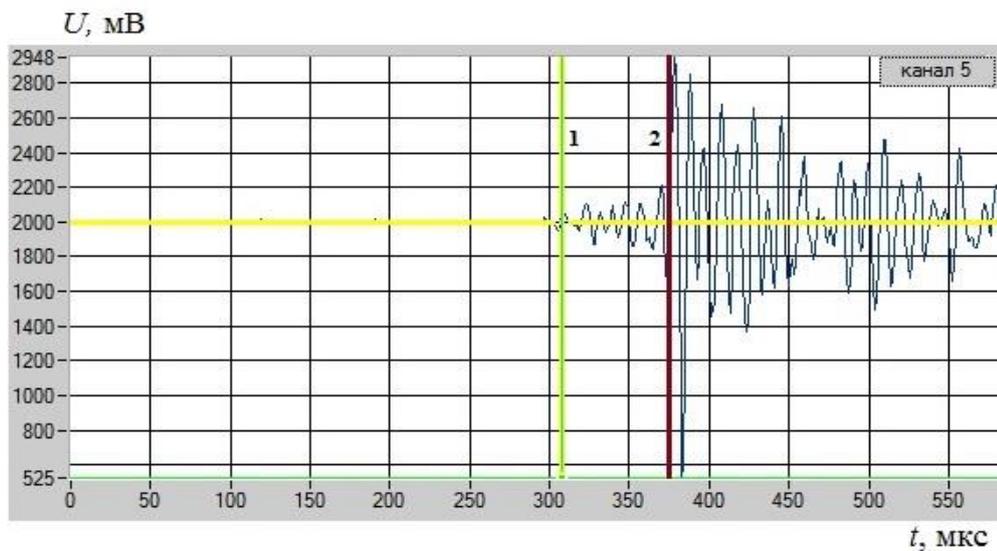


Рисунок 5.13 – Вид сигнала АЭ, у которого время прихода определено пороговым методом (1) и способом определения максимума динамической скорости нарастания переднего фронта (2)

Приведенный способ позволяет отделить сигналы, имеющие вид, представленный на рисунке 5.13, и решить проблему идентификации источников, от которых они зарегистрированы.

#### **5.4. Оценка чувствительности каналов акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек вагонов**

Чувствительность каналов – важнейший параметр, который определяет не только размеры выявляемых деградационных процессов и образующихся несплошностей, но и размеры пьезоантенн, число задействованных приемных преобразователей и иерархию системы приема и обработки сигналов АЭ.

Однако литые детали тележки грузового вагона, обладая довольно сложной формой, требуют применения новых подходов к оценке энергетических параметров сигналов, несущих основную информацию о величине происходящих необратимых процессов в деформируемой детали.

Для того, чтобы оценить влияние ослабления сигналов АЭ на пути от источника до приемников, следует сразу отметить, что источники излучают волновые пакеты, содержащие разные типы волн, имеющие сложные диаграммы направленности [213]. Это обстоятельство требует понимания того, что один и тот же источник в зависимости от местоположения и ориентации относительно приемников формирует колебания весьма большого разброса по амплитуде и энергии. Поэтому при анализе чувствительности каналов, оценке ослабления следует исследовать обязательно параметры разброса характеристик сигналов АЭ.

В рамках решения проблемы по оценке чувствительности АЭ контроля литых деталей необходимо было обратить внимание на следующие моменты:

- экспериментально исследовать чувствительность приемных каналов к величине развивающейся трещины;
- определить особенности ослабления сигнала (с учетом затухания и изменения диаграммы направленности) на пути от источников до приемников;
- разработать алгоритм учета амплитуды или энергии сигнала как характеристики процесса разрушения объекта диагностики.

Результаты исследований по оценке чувствительности изложены в работе [253].

На первом этапе провели эксперимент, включающий циклические испытания образцов из стали 20ГФЛ. Образцы имели форму, позволяющую их нагружать так, чтобы обеспечить минимальное трение берегов трещины (см. рисунок 4.20).

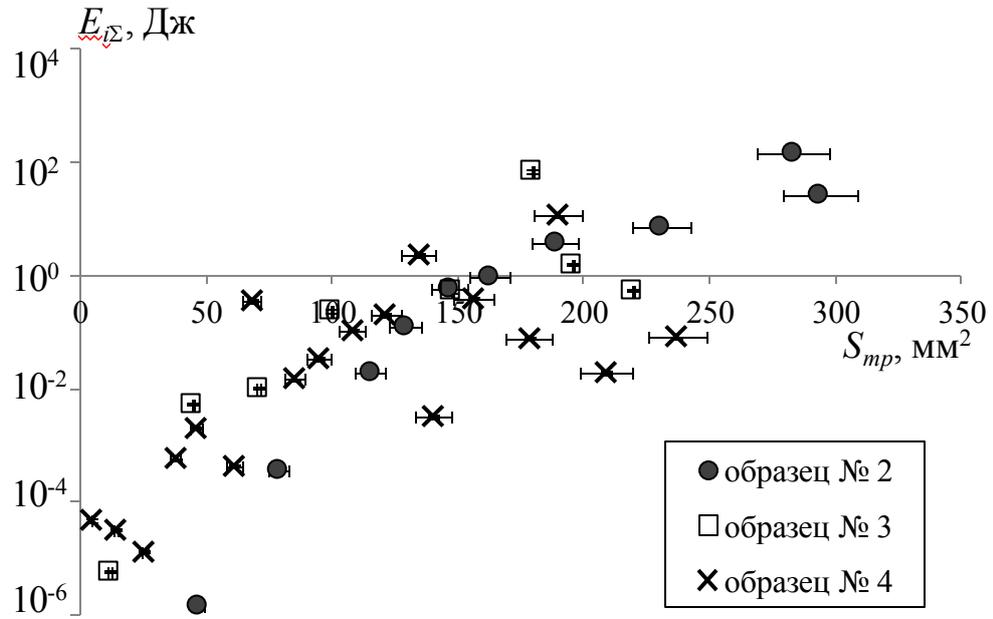
Образцы нагружали циклической асимметричной нагрузкой в диапазоне 0...25 кН с частотой 5 Гц. В процессе нагружения регистрировали глубину продвижения трещины, а при фиксированной толщине образцов определяли площадь ее приращения за определенное число циклов как простое произведение приращения длины на толщину образцов. Толщина образцов варьировалась в диапазоне от 9 до 12 мм. Всего было исследовано пять образцов.

При оценке чувствительности приемных преобразователей проводили автокалибровку, когда каждый приемник по очереди выступал в качестве источника. Учитывая, что расстояние между приемниками было 0,1...0,15 м, ослабление сигналов, находящихся на расстоянии 0,1 м относительно излученного сигнала с учетом коэффициента преобразования, затухания и расхождения волны, составляло 45...50 дБ, а на расстоянии 0,15 м – 50...55 дБ.

Далее при испытаниях регистрировали сигналы АЭ и видимую длину и ширину трещины. После фильтрации сигналов, не связанных с развитием усталостной трещины, анализировали связь длины, а значит, приблизительно и площадь приращения трещин, с энергией сигналов. При этом каждой площади приращения трещины соответствовала определенная энергия сигналов АЭ, полученная в ходе образования данной площади. Обобщенные результаты связи параметров прира-

щения трещины и соответствующей ей суммарной энергии сигналов АЭ  $\Delta E_i$  в течение того периода, за который произошло приращение трещины для трех образцов, приведены на рисунке 5.14.

а)



б)

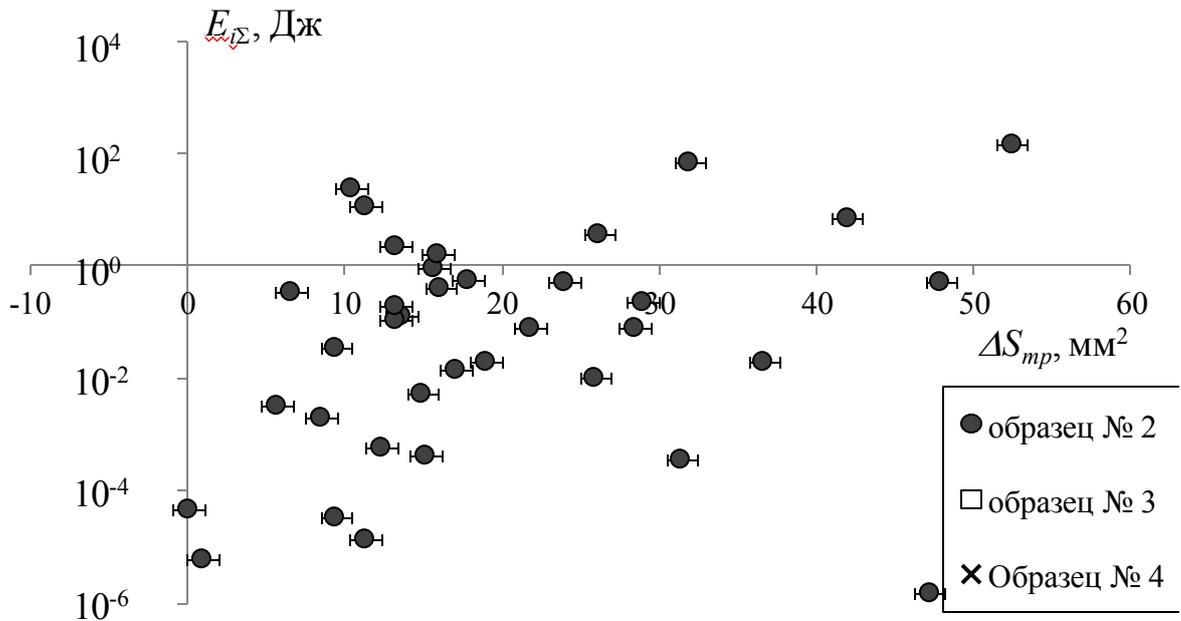


Рисунок 5.14 – Зависимость энергии АЭ  $E_{i\Sigma}$  принятых сигналов АЭ от величины площади трещины  $S_{тр}$  (а) и от приращения площади трещины за время испытаний  $\Delta S_{тр}$  (б)

Как видно из рисунка 5.14,  $a$ , увеличение площади развивающейся трещины  $S$  приводит к явному увеличению излученной ею энергии  $\Delta E_i$  сигналов АЭ за промежутки времени между измерениями ее длины. Этот параметр АЭ был выбран не случайно, так как он соотносится с реальными данными, которые можно получить при АЭ испытаниях объекта, когда трещина уже имеет некие реальные размеры и в процессе испытаний дополнительно прирастает на конечную величину.

Если проанализировать результаты всех трех представленных на рисунке 4.15,  $a$  образцов, то зависимость энергии сигналов АЭ от площади трещины имеет наибольший коэффициент корреляции для степенной зависимости вида:

$$\Delta E_i = aS_{\text{тр}}^b, \quad (5.7)$$

где коэффициент  $a$  имеет величину  $4 \cdot 10^{-10}$ , а  $b = 4,06$ .

Коэффициент корреляции для такой зависимости  $R$  составляет 0,82, что является достаточно высоким показателем, иллюстрирующим явную связь приведенных параметров. Вместе с тем если рассматривать зависимости по каждому образцу отдельно, то для каждого образца наиболее оптимальной является также степенная зависимость, параметры которой приведены в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Параметры степенной зависимости испытанных образцов в соответствии с формулой (5.6)

Номер образца	$a$	$b$	$R$
2	$3 \cdot 10^{-22}$	9,56	0,978
3	$7 \cdot 10^{-11}$	4,63	0,939
4	$3 \cdot 10^{-8}$	2,97	0,789

Полученные параметры степенной зависимости достаточно сильно различаются, но при этом следует учитывать, что у образцов № 2 и 4 большое влияние на характеристики зависимости оказывали литейные раковины и ликвации, находящиеся на пути трещины. И именно у этих образцов наблюдаются существенные отклонения параметров степенной зависимости. В то же время параметры степен-

ной зависимости образца № 3, в котором на пути трещины не было зафиксировано дефектов литья, в конечном изломе имеют достаточно близкие значения к обобщенным параметрам степенной зависимости.

Однако если посмотреть на результаты в виде связи энергии сигналов АЭ за интервал времени, за который трещина приросла площадью  $\Delta S_{\text{тр}}$ , то становится ясно, что эта связь не столь очевидна и имеет низкий коэффициент корреляции (рисунок 5.14, б). При этом отмечается, что наиболее выраженная зависимость также соотносится с образцом № 3, не имеющим крупных дефектов литья на пути развития, и также является степенной (показатель степени 3,33).

Следует помнить, что при АЭ диагностике в реальных условиях нет возможности проводить длительные циклические испытания для объектов массового производства и выводы необходимо делать по результатам 1–5 циклов нагружения, которые не будут характеризоваться большим приращением трещины, вершина которой находится в области с неизвестным для исследователя структурным состоянием. Поэтому график зависимости суммарной энергии сигналов АЭ от общей площади развившейся трещины, приведенный на рисунке 5.14, а, является важным для анализа состояния литой детали и требует адекватной оценки погрешности определения размеров трещины с учетом скрытых несплошностей, на которых, возможно, находится вершина трещины во время испытаний.

Таким образом, формулу (5.6) можно использовать для оценки величины трещины и ее приращения за время испытаний в зависимости от полученной суммарной энергии сигналов АЭ для литой стали 20ГФЛ, из которой изготавливают объекты контроля – литые детали подвижного состава железных дорог.

Кроме того, в ходе данного эксперимента дополнительно оценивали количество сигналов дискретной АЭ, которая может прийти на приемные преобразователи, установленные с заданной чувствительностью в зависимости от величины трещины и ее приращения на этапе, предшествующем моменту АЭ испытаний.

Понимание того, сколько сигналов АЭ может быть зарегистрировано с заданным уровнем чувствительности при развитии трещин в определенном матери-

але, является важным пороговым показателем возможностей метода по их обнаружению и идентификации.

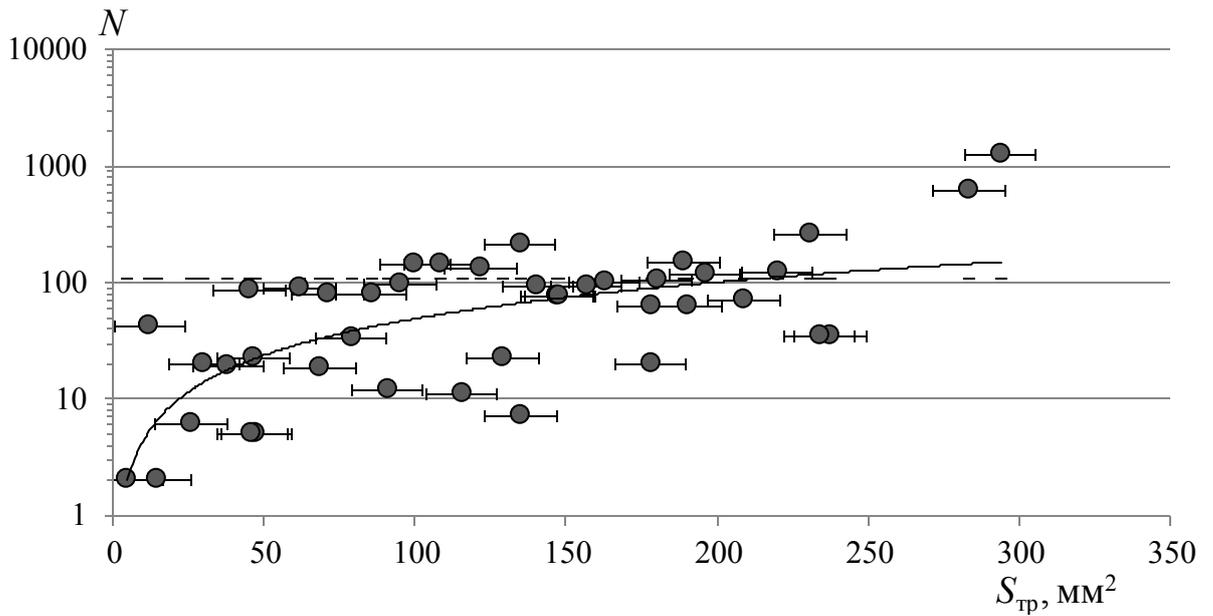
На рисунке 5.15 приведены экспериментальные данные, характеризующие связь числа сигналов АЭ при статическом нагружении образца с трещиной от ее площади  $S_{тр}$  и приращения этой площади  $\Delta S_{тр}$  для четырех исследованных образцов. Статическое нагружение проводили периодически с повышением нагрузки в 1,2 раза по сравнению с циклической нагрузкой, при которой выращивали трещину.

Из представленной на рисунке 5.15, *a* картины наблюдается выраженная степенная зависимость числа сигналов от общей площади развившейся трещины. При анализе данных намеренно не выделяли значения разных образцов, так как параметры отдельных образцов не влияют на результаты. Степенная зависимость имеет коэффициент корреляции 0,67 и показатель степени 1,04, который показывает принципиально слабое отличие от линейной функции зависимости.

Конечно, построение непрерывной зависимости для дискретной величины числа сигналов не имеет физического смысла, тем не менее такая связь позволяет хотя бы приблизительно оценить граничные возможности применения метода АЭ для объектов из заданного материала – литой низколегированной стали. Минимальное число зарегистрированных сигналов – 2 в самом начале развития трещины, максимальное – 1 252 – перед разрушением.

По построенной на рисунке 5.15 зависимости видно, что при данном уровне чувствительности вполне возможно зарегистрировать 2 сигнала АЭ при площади развивающейся трещины около  $10 \text{ мм}^2$ . Следует отметить, что количество сигналов АЭ для любой величины трещины носит вероятностный характер. Также с вероятностной точки зрения следует говорить и о возможной площади развитой трещины в зависимости от числа полученных сигналов АЭ. Для того чтобы уверенно говорить в вероятностном аспекте о размерах трещины по данным АЭ, необходимо провести большое число дополнительных экспериментов.

а)



б)

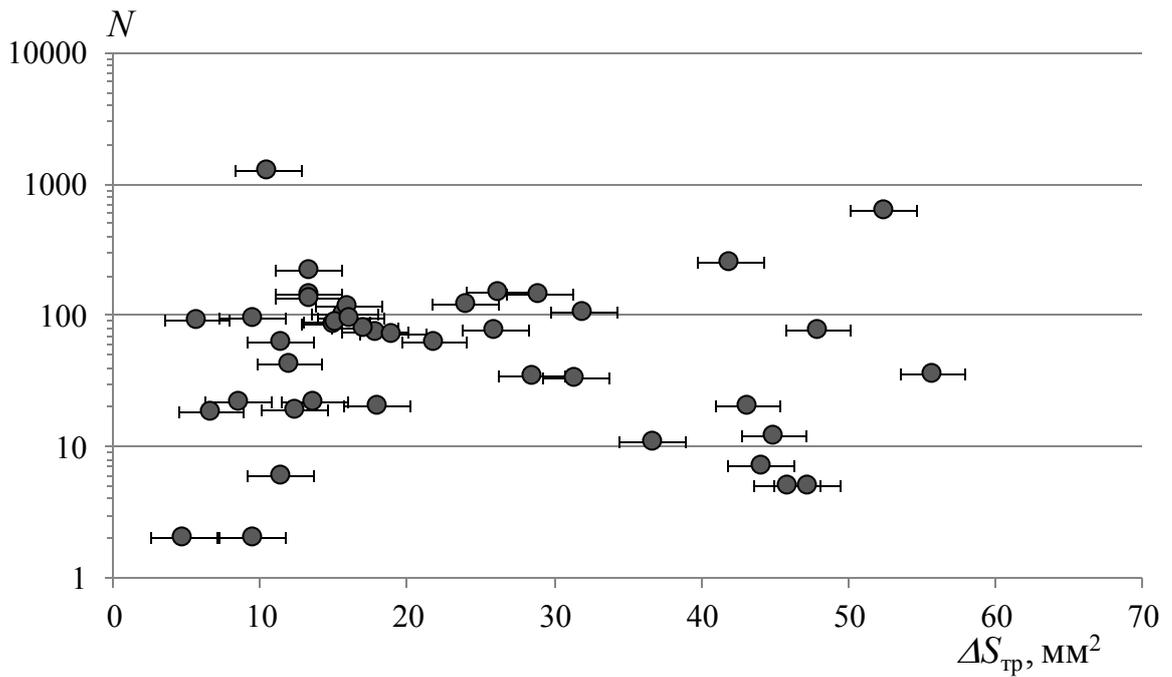


Рисунок 5.15— Связь числа зарегистрированных сигналов АЭ при статических испытаниях  $N$  с параметрами  $S_{\text{тр}}$  (а) и  $\Delta S_{\text{тр}}$  (б)

Представленные на рисунке 5.15, б данные в координатах  $\Delta S_{\text{тр}} - N$  показывают отсутствие явного влияния приращения трещины на число сигналов АЭ. Хотя следует признать, что выделить данные на участках с относительно крупными литейными дефектами на пути развития магистральной трещины и участках, где

трещина развивалась на бездефектных участках, не представилось возможным в ходе данных экспериментов.

На последнем этапе анализа чувствительности каналов осталось определить влияние ослабления акустического сигнала на пути от источника до приемника в литых деталях. Так, в описанном эксперименте приемники находились на расстоянии 40...150 мм при толщине образцов 9...12 мм. Реальные детали имеют толщину в отдельных участках до 35 мм и большую шероховатость и волнистость поверхности, что дополнительно сказывается на рассеянии акустических волн.

Кроме того, подавляющее большинство волн АЭ в литых деталях формируется в частотном диапазоне 100...400 кГц, что соответствует длине волны, сравнимой с их толщиной. Влияние всех этих факторов требует дополнительного исследования причин ослабления волн на пути от источника до приемного преобразователя. В общем виде формулу для ослабления сигналов АЭ, учитывающую поглощение, рассеяние и дополнительное рассеяние при отражении от стенок объекта и препятствиях, можно представить в виде:

$$U_{\Pi}(r) = U_0 \cdot K \cdot \frac{1}{r^{n \cdot e^{\delta r}}}, \quad (5.8)$$

где  $U_{\Pi}$  – амплитуда сигнала, регистрируемая приемным преобразователем;  $U_0$  – амплитуда излученного источником сигнала АЭ;  $K$  – комплексный коэффициент, учитывающий как особенности формирования сигнала с учетом характеристик источника, так и характеристики преобразования сигнала из акустического в электрический;  $r$  – расстояние от источника до приемника;  $n$  – показатель степени, учитывающий особенности отражения волн в объекте контроля;  $\delta$  – коэффициент затухания.

Основные характеристики, которые интересны с точки зрения потерь амплитуды сигнала при его распространении в объекте –  $r$  и  $\delta$ .

Обеспечить стабильность остальных параметров в уравнении (5.7) при вычислении  $n$  и  $\delta$  можно при постановке эксперимента с известным расстоянием между источником и двумя приемниками  $r_1$  и  $r_2$ , а также полученными экспериментально значениями амплитуд сигналов  $U_{n1}$  и  $U_{n2}$ . После этого требуется ре-

шить систему уравнений, в котором коэффициент затухания  $\delta$  выражаем из первого уравнения:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{K \cdot U_0}{U_{п1} \cdot r_1^n}\right)}{r_1}. \quad (5.9)$$

Далее решаем второе уравнение вида:

$$\ln n = \frac{\ln(r_2) \cdot U_{п2} \cdot \exp\left(\frac{r_2}{r_1} \ln\left(\frac{K \cdot U_0}{U_{п1} \cdot r_1^n}\right)\right)}{K \cdot U_0}. \quad (5.10)$$

Таким образом, можно получить значения параметров  $n$  и  $\delta$ , поставив различные эксперименты, в том числе изменяя свойства объекта как волновода (например, проводя эксперимент на участке изменения сечения детали, изменения направления распространения волны, расщепления волны на два волновода и т.д.). Кроме того, можно учитывать огибание волной неоднородностей.

Использование формул (5.8) и (5.9) позволило определить, что показатель степени  $n$  с небольшими отклонениями близок к единице. Таким образом, получается, что наиболее энергоемкая волна в волновом пакете АЭ, распространяющемся от источника до приемника, имеет природу поверхностных волн или волн в слоях. Значение коэффициента затухания колеблется в пределах  $2 \dots 8 \text{ м}^{-1}$ . При этом влияния изменения направления распространения волны на коэффициент затухания  $\delta$  не обнаружено.

## **5.5. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля литых деталей с повышенной чувствительностью в отдельных участках**

Проведенные исследования показывают, что вопрос чувствительности АЭ контроля является важным. Повышение чувствительности каналов АЭ приводит к повышению достоверности результатов диагностики. Однако с учетом достаточно

больших потерь акустической энергии при распространении сигналов АЭ необходима адекватная оценка возможностей при оценке дефектов, обнаруживаемых на разных участках исследуемых объектов. Безусловно, объекты сложной формы с внутренними несплошностями и неоднородной структурой в этом смысле существенно усложняют ситуацию с достоверной оценкой состояния объекта.

Анализ распределения сигналов АЭ получаемых при нагружении и образцов и литых деталей показывает, что большинство из них, регистрируемых каждым преобразователем, является низкоамплитудными и распределяются они по шкале амплитуд по экспоненциальной кривой (рисунок 5.16). Таким образом, часть сигналов с низкой амплитудой не регистрируется соседними каналами или регистрируется с большой погрешностью по времени прихода и не учитывается при обработке.

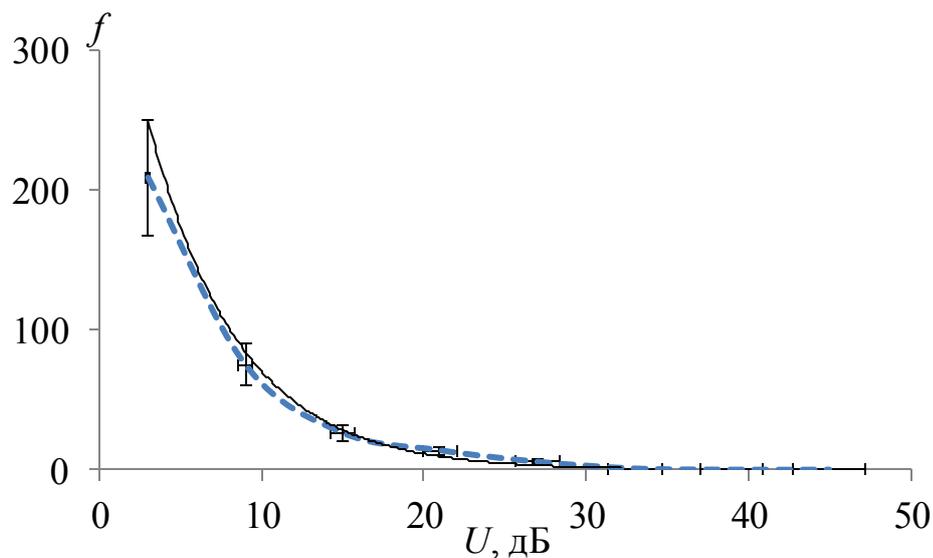


Рисунок 5.16 – Распределение частоты появления сигналов АЭ в зависимости от амплитуды (штриховая линия – эксперимент; сплошная – теоретическая)

Проблему повышения информативности можно частично решить за счет выбора места установки приемных преобразователей антенны. Так, приемники АЭ можно устанавливать в места наиболее вероятного образования дефектов в процессе эксплуатации, а остальные преобразователи антенны размещать так, чтобы

можно было локализовать источники в остальных потенциально опасных участках. Кроме того, необходимо 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.

С учетом того, что в боковых рамах наиболее нагруженными и потенциально опасными участками являются внутренние углы буксовых проемов и нижний угол рессорного проема, а на надрессорной балке – наклонный пояс и средняя часть нижнего пояса, основные и дополнительные приемные датчики располагаются по схеме, представленной на рисунке 5.17. Основные принципы такого подхода изложены в работе [254].

Поставленная задача решается за счет того, что предварительно определяют акустические свойства материала объекта контроля. Затем устанавливают первичные преобразователи, проверяют работоспособность акустико-эмиссионной аппаратуры и в файл обработки информации формируют координатную сетку объекта и заносят координаты приемных преобразователей в память системы.

На следующем этапе проводится калибровка каналов, во время которой определяются значения амплитуды сигналов, поступающих от имитатора в заданных точках координат источника. На основании полученных значений координат источника и приемников, значений коэффициента затухания и амплитуд зарегистрированных сигналов корректируется величина требуемого коэффициента усиления каналов для выравнивания чувствительности приемных каналов.

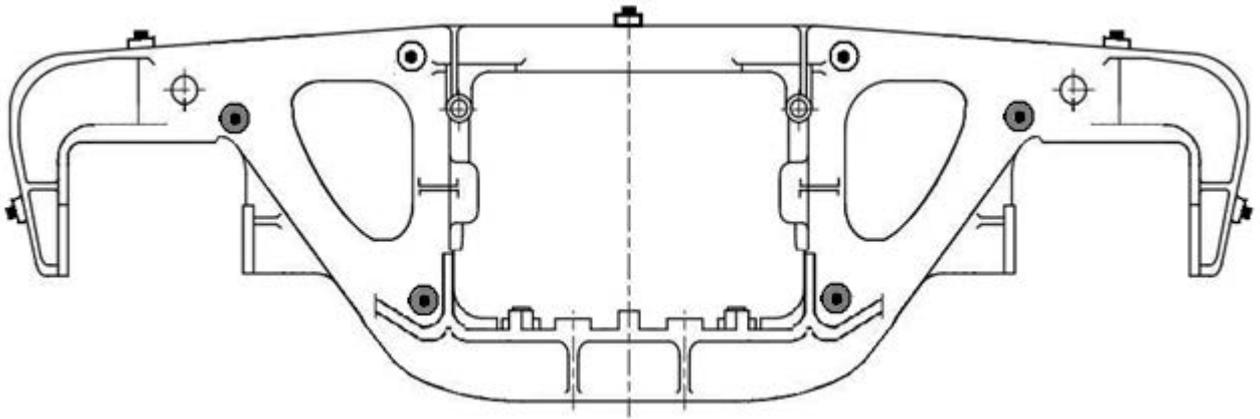
Далее объект контроля нагружают и одновременно измеряют и регистрируют среднеквадратическое значение амплитуды сигналов акустической эмиссии через

равные интервалы времени, длительность которых определяется скоростью изменения нагрузки от минимального до максимального значения:

$$\Delta t = (0,001 \dots 0,01) \cdot T_{\text{наг}}, \quad (5.11)$$

где  $T_{\text{наг}}$  – длительность времени изменения нагрузки от минимального до максимального значения.

а)



б)

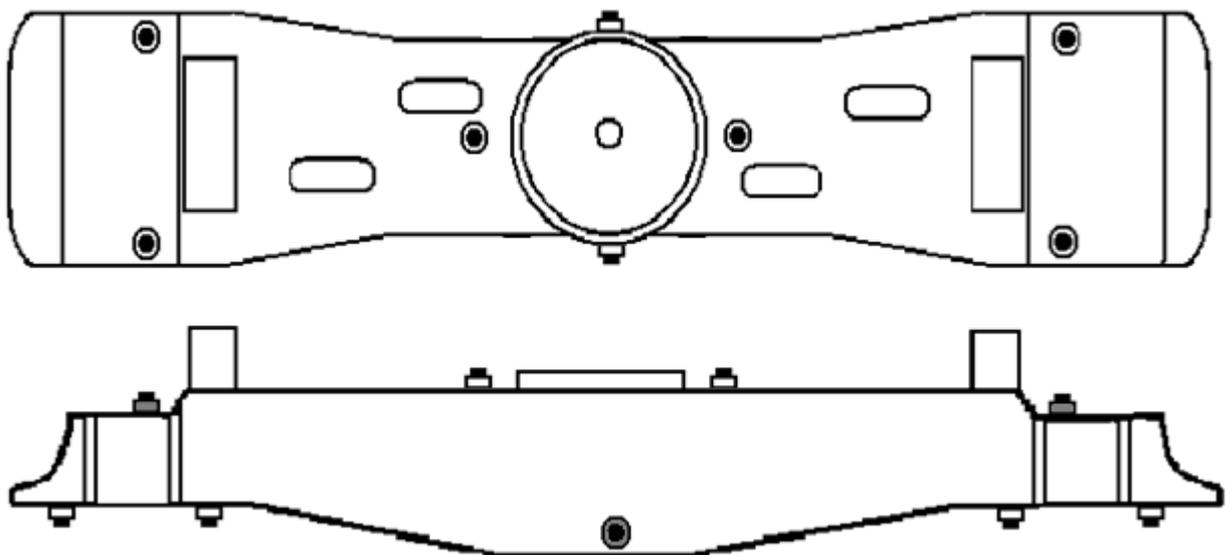


Рисунок 5.17 – Боковая рама (а) и надрессорная балка (б) с установленными приемными преобразователями (серым цветом выделены датчики в наиболее потенциально опасных участках)

По результатам измеренных значений среднего квадратического отклонения амплитуды сигналов на последующий за измерением интервал времени для каждого канала устанавливают порог равный:

$$P_i = k \cdot \sigma_i, \quad (5.12)$$

где  $\sigma_i$  - значение среднего квадратического отклонения амплитуды сигнала с  $i$ -го канала;  $i$  – номер канала от 0 до  $n$ ,  $k$  – коэффициент, изменяющийся в пределах от 2 до 5 в зависимости от характера шумов аппаратуры.

При этом регистрируют сигналы акустической эмиссии с  $i$ -го канала, превышающие установленный порог  $P_i$ , и определяют параметры этих сигналов, по которым определяют координаты развивающихся дефектов и судят об их степени опасности.

Используя зарегистрированные значения стандартного отклонения амплитуды сигналов АЭ, определяют величину непрерывной эмиссии от источников по экспериментально установленной зависимости

$$S_d = k \cdot \frac{(\langle \sigma_i \rangle - \sigma_{ш})^2}{P}, \quad (5.13)$$

где  $\langle \sigma_i \rangle$  – среднее значение стандартного отклонения амплитуды сигнала, мкВ;  $P$  – текущее значение нагрузки на ОК, МПа;

$$k = 10^4 \frac{\text{мм}^2 \cdot \text{МПа}}{\text{мВ}^2}.$$

Кроме того, разработана принципиальная схема многоканальной АЭ системы для контроля деталей по описанной методике. Такая система включает  $n$  измерительных каналов, каждый из которых состоит из последовательно соединенных акустического преобразователя, предварительного усилителя, фильтра, основного усилителя, пикового детектора, выход которого соединен с инвертирующим входом компаратора, таймера, устройства сопряжения, шины компьютера, последовательно соединенных аналого-цифрового преобразователя, основного усилителя, оперативного запоминающего устройства, выход которого соединен с первым входом устройства сопряжения, а второй вход – с первым выходом таймера, аналого-цифрового преобразователя, соединенного с четвертым выходом устройства сопряжения. В такой системе контроля также установлены последовательно соединенные детектор среднеквадратического значения сигнала, вход которого соединен с выходом основного усилителя, устройство выборки и хранения. При этом выход детектора среднеквадратического значения сигнала соединен с анало-

говым входом устройства выборки и хранения, аналогового умножителя. Первый вход аналогового умножителя соединен с выходом устройства выборки и хранения и второй вход с выходом аналого-цифрового преобразователя, а выход аналогового умножителя соединен с неинвертирующим входом компаратора. Устройство также содержит блок регистрации непрерывных сигналов АЭ, состоящий из последовательно соединенных аналого-цифрового преобразователя, оперативного запоминающего устройства, причем вход аналого-цифрового преобразователя соединен с выходом устройством выборки и хранения. Выход оперативного запоминающего устройства соединен с пятым входом устройства сопряжения. Устройство регистрации непрерывных сигналов акустической эмиссии содержит таймер, вход которого соединен с устройством сопряжения, первый выход соединен с управляющим входом устройства выборки и хранения, а второй выход соединен с оперативным запоминающим устройством.

Предлагаемая система, в отличие от существующих аналогов [255, 256], позволяет в процессе контроля регулировать без остановки регистрации сигналов пороги акустических каналов, а следовательно, уменьшает вероятность пропуска дефектов и снижает чувствительность к шумам. Кроме того, предлагаемая система регистрирует параметры непрерывных сигналов АЭ, которые могут возникать в наиболее нагруженных местах вследствие упругого и пластического деформирования с необратимыми изменениями структуры металла.

Были проведены исследования АЭ на боковых рамах и надрессорных балках грузовых вагонов. Экспериментальные исследования проводили с помощью системы СЦАД 16.03. Для этого преобразователи были установлены в соответствии с рисунком 4.17. Уровень собственных шумов приемных преобразователей составил 7...16 мкВ, а порог срабатывания АЭ системы был установлен на 6 дБ выше уровня шумов. При оценке чувствительности имитатором Су-Нильсена с твердостью 2Н на расстоянии 200 мм от каждого приемника были получены сигналы с амплитудой на 40...45 дБ выше порога.

Обработка результатов контроля боковых рам во внутренних углах буксовых проемов (на самом потенциально опасном участке исходя из статистических дан-

ных) дает возможность разделять ложные источники и развивающиеся трещины на самых ранних стадиях развития. На рисунке 5.18 представлены результаты АЭ контроля с использованием трехуровневой методики.

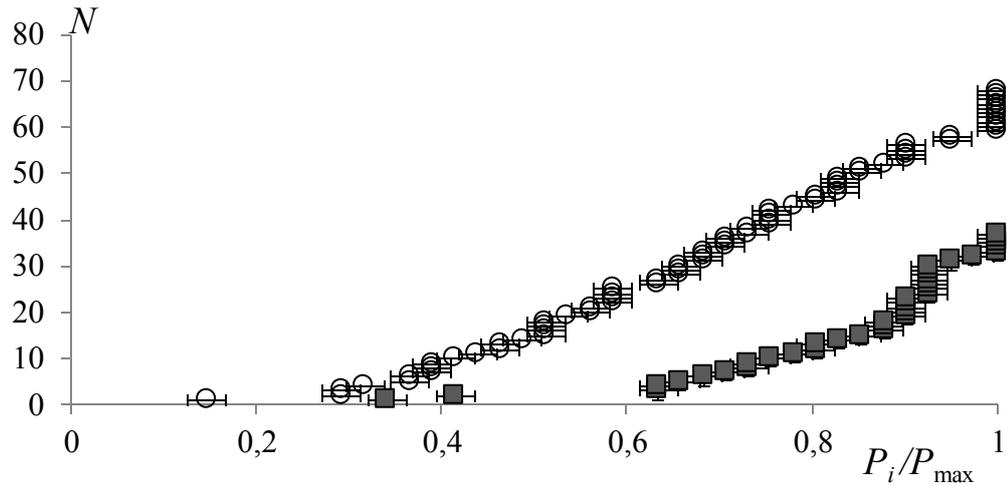
В боковой раме № 30621 (рисунок 5.18, а) находится участок, отремонтированный сваркой в нижнем углу наклонного пояса. В этой детали в процессе АЭ диагностирования зарегистрированы как 37 локализованных сигналов АЭ (третьего уровня идентификации), так и еще 31 сигнал, зафиксированных только одним, ближайшим к источнику преобразователем (второго уровня). Последующая шлифовка участка пневматической машиной, визуальный и магнитный контроль зачищенного участка подтвердил наличие дефектов сварки содержащей растрескивания в месте границы основного и наплавленного металла. Большинство деталей с идентифицированными дефектами излучают АЭ сигналы и второго и третьего уровня, но как правило меньшее число по сравнению с приведенным.

Боковая рама № 12979 (рисунок 5.18, б) содержит развивающийся видимый дефект – усталостную трещину. По выходящим поверхностям ее площадь можно оценить  $300 \pm 100$  мм<sup>2</sup>. Такое разрушение не сопровождается сигналами АЭ второго уровня идентификации. Подобного рода дефекты в половине случаев не излучают АЭ второго уровня, а только локализованные сигналы с относительно большой амплитудой, что согласуется с данными о том, что увеличение скорости роста трещин сопровождается повышением уровня амплитуды и энергии сигналов АЭ

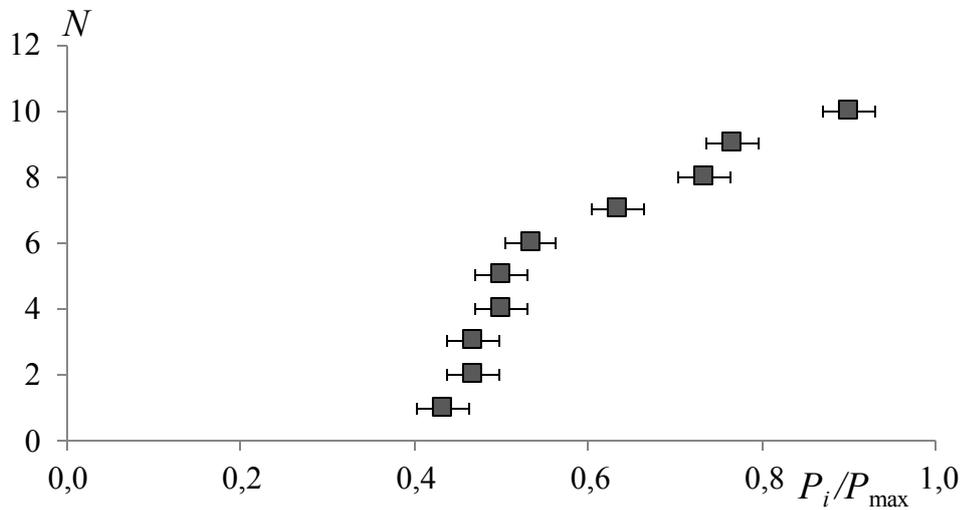
В боковой раме № 66198, напротив, в процессе испытательного нагружения было принято только три локализованных сигнала (см. рисунок 5.18, в), однако помимо этих сигналов ближайший к источнику преобразователь зафиксировал еще 11 сигналов, в том числе при максимальной нагрузке, что явилось признаком развивающейся на ранней стадии трещины, подтвержденной при металлографическом анализе.

Следует отметить, что для сигналов, регистрируемых только ближайшим к источнику приемником, имеет смысл определять  $N_{\Sigma}$ , так как с энергетической точки зрения они содержат не более 10 % энергии от суммарного значения.

а)



б)



в)

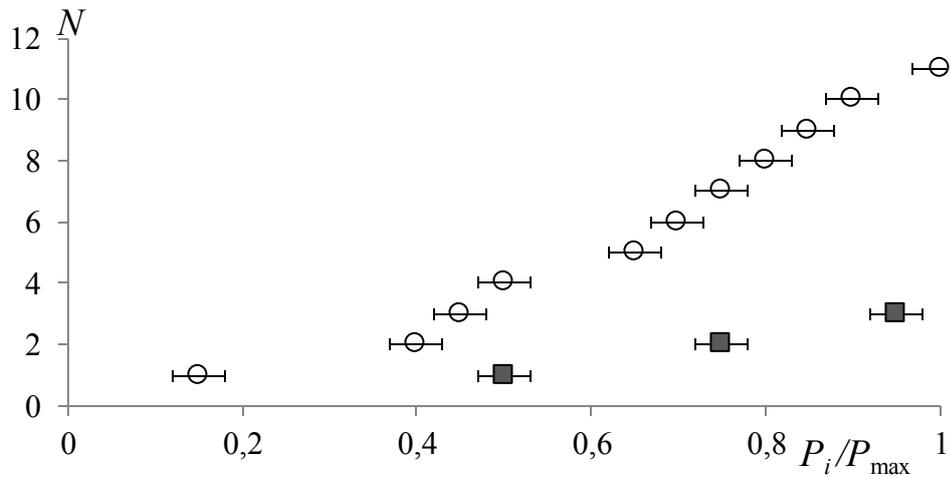


Рисунок 5.18 – Изменение суммарного счета дискретной АЭ второго (○) и третьего уровня регистрации (■) для источника в углу буксового проема боковых рам № 30621 (а), 12979 (б), 66198 (в)

Дополнительно были проанализированы сигналы АЭ и боковых рам и надрессорных балок. В случаях, когда оценка результатов была затруднена, использование анализа суммарного счета сигналов второго уровня позволило определиться с участком локального контроля ультразвуковым или феррозондовым методами для определения величины неоднородности структурного состояния.

Непрерывную АЭ можно было выделить только в некоторых случаях. Во всех случаях, когда была обнаружена непрерывная АЭ, ее уровень не превышал 9 дБ от уровня собственных шумов приемных преобразователей. Из шести идентифицированных процессов непрерывной АЭ три продолжались до появления сигналов второго и первого уровня. Как только стали регистрироваться такие сигналы, уровень непрерывной АЭ упал. В остальных трех случаях появившаяся непрерывная АЭ продолжалась до конца испытаний, но при этом ее уровень колебался в пределах 3-9 дБ от уровня собственных шумов преобразователя, около которого она была зарегистрирована. Приведенные результаты могут быть связаны с тем, что непрерывная АЭ характерна для локальных процессов в достаточно больших объемах и при появлении выраженных концентраторов она значительно ослабевает.

Анализ АЭ-данных при пневматическом нагружении сосудов, изготовленных из стали 09Г2С и СтЗ дает аналогичные результаты.

Кроме того, анализ непрерывной АЭ принципиально показывает наличие необратимых процессов и может позволить отслеживать зарождение и развитие дефектов на самых ранних стадиях.

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 от сигналов (включая нелокализованные) пришедших на ближайший к источнику приёмник  $N_{0\Sigma i}$ :

$$k_{sc} = \frac{N_{\Sigma i}}{N_{0\Sigma i}}. \quad (5.14)$$

Тогда 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.

Доля локализованных сигналов для участков пластической деформации, локальных разрушений дефектных структур и стабильного развивающейся усталостной трещины колеблется в пределах 0,2...0,8.

Для трещины переходящей к стадии ускоренного роста перед разрушением нелокализованные сигналы практически исчезают и  $k_{sc} > 0,85$ .

### **Выводы по пятой главе**

Подводя итоги исследований методических аспектов регистрации и обработки АЭ информации, можно отметить, что в этом направлении в настоящее время в научных источниках представлено относительно мало исследований. Это делает названное исследовательское направление открытым для использования новых научных подходов и при записи, и при обработке АЭ данных.

В данной главе рассмотрены основные методологические вопросы обеспечения достоверности АЭ контроля: вопрос оценки и повышения чувствительности контроля и вопрос достоверной локализации источников АЭ.

Проведенные исследования показывают, что для повышения точности определения координат источников можно использовать вероятностный подход к определению времени начала сигналов АЭ. Результаты обработки сигналов позволили определить, какие методы установления времени начала сигналов АЭ имеют наибольшую вероятность оценки с заданной погрешностью. Исследования позволили установить наиболее достоверные методики в зависимости от комби-

нации параметров: максимальной амплитуды сигналов и их времени нарастания. Следует отметить, что данное направление имеет широкую перспективу развития ввиду большого числа параметров АЭ сигналов, способов определения времени прихода сигналов, способов расчета координат источников.

Установлено, что в литых деталях грузовых вагонов основную энергию несут поверхностные волны и волны в слоях. На изменение волнового пакета сигнала главное влияние оказывает волнистость и шероховатость поверхности, а также частично наличие внутренних несплошностей и неоднородностей структуры литых деталей.

Экспериментально определено, что локализованные потоки сигналов АЭ регистрируются при развитии трещин в литой низколегированной стали площадью  $10 \text{ мм}^2$ . По числу сигналов и суммарной энергии сигналов АЭ, полученных в ходе статических испытаний, можно с определенной погрешностью оценить площадь развивающейся трещины.

Предложено применение антенн, в которых основные приемники устанавливаются в непосредственной близости с наиболее потенциально опасными участками контролируемых изделий. Это позволяет методически повысить информативность контроля и достоверность идентификации источников АЭ. Также предложена функциональная схема АЭ системы, реализующая трехуровневый подход к регистрации сигналов и их обработке с фиксацией локализованных сигналов, несущих основную информацию об источнике, нелокализованных сигналов от источника и непрерывной эмиссии, которая может возникнуть при множественных очагах изменений структуры в наиболее нагруженной области диагностируемого изделия.

Для идентификации источников можно использовать коэффициент масштаба событий, который является отношением числа локализованных от источника сигналов к общему числу сигналов от источников (включая нелокализованные) пришедших на ближайший к источнику приёмник.

## ГЛАВА 6. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ ДЕФЕКТНОСТЬЮ

### 6.1. Основные параметры акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов

В настоящее время для НК крупных литых деталей (боковых рам и наддресорных балок) грузовых вагонов в условиях вагоноремонтных депо используются визуальный осмотр, магнитный и вихретоковый методы. Дефекты литья (поры, раковины, неслитины и т.д.), неровная поверхность со следами формовочной смеси, шлака, окалины, цемента оказывают существенное влияние на достоверность контроля активными методами НК, так как при этом необходимо сканировать исследуемый объект. Общие ограничения магнитного и вихретокового контроля связаны с невозможностью выявления глубоко залегающих дефектов, которые могут повышать вероятность зарождения усталостных трещин. При этом минимальные размеры регистрируемых дефектов вихретоковым и ФЗ методами контроля определяются шагом сканирования и составляют от 5 до 8 мм соответственно.

С 2002 г. в вагонных ремонтных депо при продлении срока службы боковых рам используется метод АЭ, основанный на регистрации акустических волн, возникающих при нагружении в ОК в процессе динамической перестройки его внутренней структуры [8]. Методы нагружения играют важную роль, так как для иницирования источников АЭ необходимо создавать нагрузки, соответствующие реальным условиям эксплуатации объекта и превышающие на 5...25 % рабочие. В контролируемых зонах объекта за счет действия нагрузки обеспечивается напряженное состояние конструкции, когда под действием деформации растяжения по-

являются акустические сигналы, характеризующие дефектные зоны. Поскольку параметры сигналов АЭ связаны с кинетикой разрушения материалов, то применение данного метода дает наиболее объективную информацию и позволяет выявлять опасные, развивающиеся под нагрузкой дефекты.

Средства АЭ-контроля строятся на основе микропроцессорной техники, проводящей автоматически регистрацию, обработку и постановку диагноза ОК в режиме реального времени. Метод АЭ осуществляет автоматизацию измерений, локацию развивающихся дефектов с последующей браковкой ОК, классификацию дефектов по степени опасности, до минимума снижает влияние дефектоскописта на результаты контроля.

Однако значительный уровень шумов в литых деталях [257-259] снижает чувствительность метода и затрудняет расчет координат дефектов, а проводимая фильтрация приводит к пропуску полезных сигналов. Во время АЭ-контроля могут регистрироваться не только источники, связанные с дефектом, но и посторонние шумы от испытательной установки, трения и т.д. Около 90 % зарегистрированных сигналов относятся к акустическим помехам, поэтому данный метод требует тщательной методической проработки и проведения предварительных испытаний. Кроме того, обработка результатов АЭ-контроля показала, что даже опасные дефекты могут быть относительно слабыми источниками упругих волн, которые регистрируются ПАЭ. Это связано с протяженными зонами контроля, литой структурой металла, расположением дефекта, величинами нагрузок и т.д.

На рисунке 6.1 показан внешний вид стендов для нагружения боковых рам и надрессорных балок и устройство коммутации, позволяющее в автоматическом режиме переключать входные каналы системы СЦАД-16.03 со стенда по испытаниям боковых рам на стенд по испытаниям надрессорных балок и наоборот. Стационарные кабели прокладываются от системы к каждому из стендов, что увеличивает их срок службы. Использование стационарно установленных ПАЭ и предварительных усилителей исключает их перенос со стенда на стенд, что также увеличивает срок службы данных устройств.

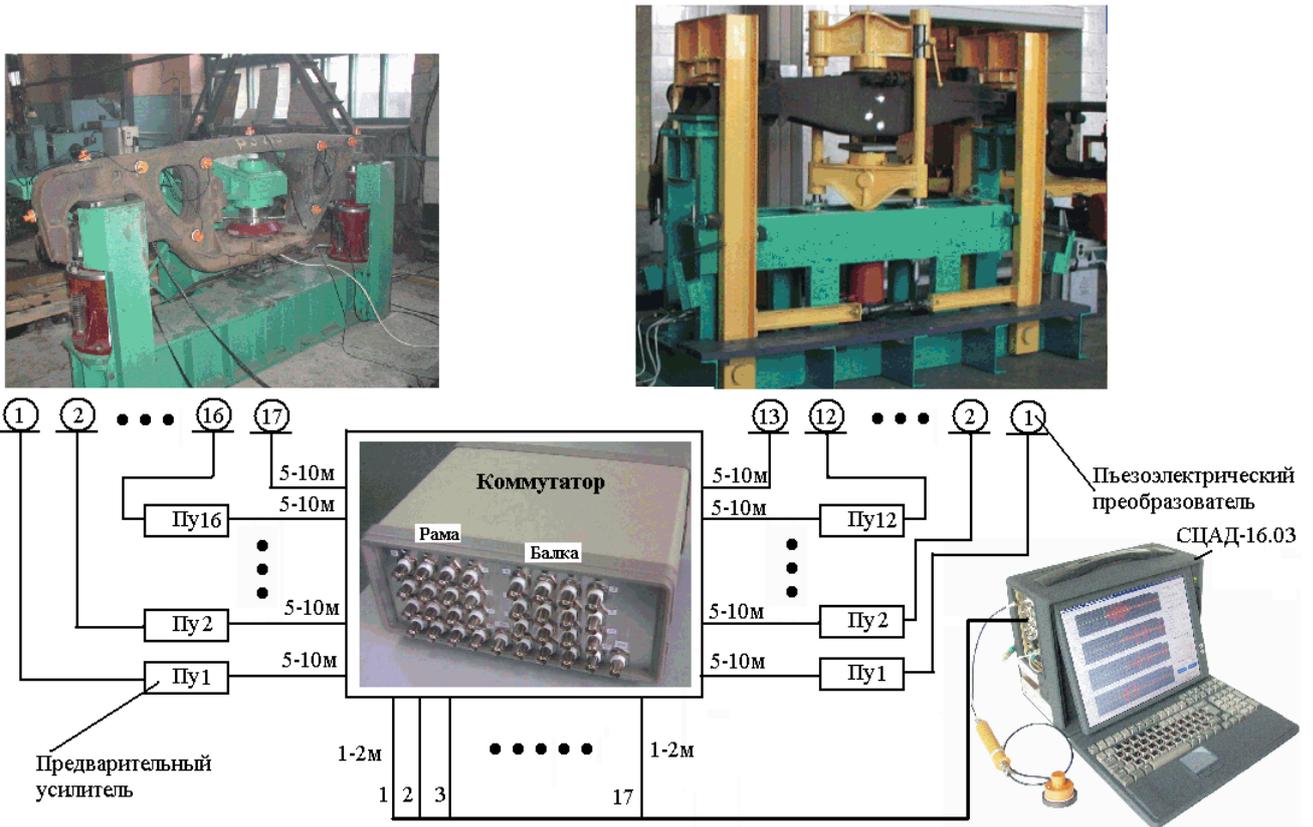


Рисунок 6.1 – Внешний вид стендов для нагружения боковых рам и надрессорных балок и устройство коммутации для их подключения к АЭ-системе СЦАД-16.03

Повышение достоверности АЭ контроля боковых рам и надрессорных балок ввиду наличия известных недостатков литых деталей для этого метода требует глубокого анализа результатов контроля источников различного типа, что существенно снизит как перебраковку, так и недобраковку деталей.

К упомянутым недостаткам, приводящим к низкой контролепригодности литых деталей грузовых вагонов не только для АЭ метода, но и для всех остальных методов НК, относятся:

- сложная форма деталей и наличие внутренних несплошностей существенно изменяет акустический тракт и приводит к усложнению интерпретации результатов контроля;
- наличие окалины и других достаточно хрупких материалов на поверхности деталей является источником дополнительной АЭ, как правило, не связанной с развитием опасных дефектов;

– большая шероховатость и неровность поверхности боковых рам и надрессорных балок является дополнительным источником АЭ при взаимодействии с элементами нагружающего устройства и пластическом деформировании.

Вся деталь при АЭ контроле разбивается на 16 зон, с различными конфигурациями и критериями дефектности, в зависимости от нагрузки и вероятности трещинообразования.

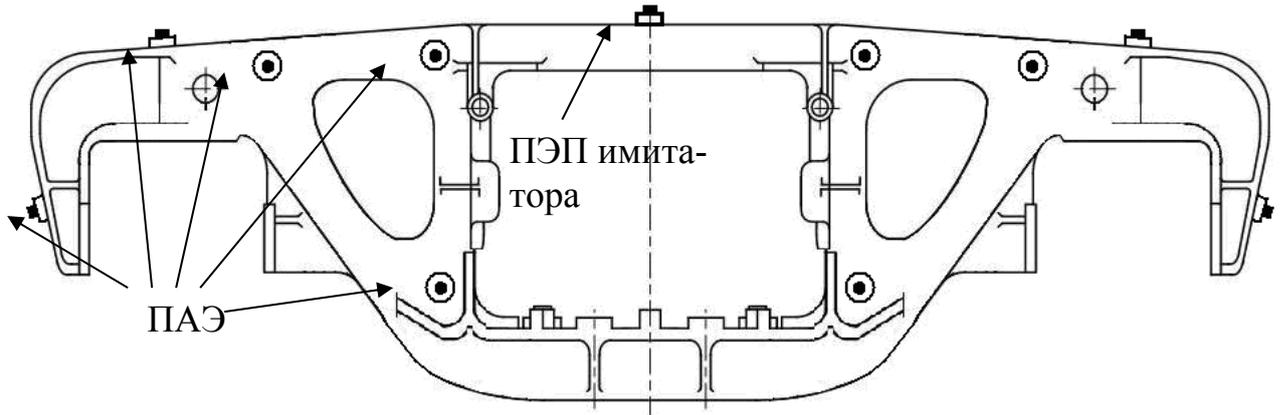
Боковые рамы нагружают двумя видами испытательной нагрузки, превышающей рабочую динамическую на 25 %. Места приложения нагрузки указаны на рисунке 6.2. Для диагностики углов буксовых проемов прикладывается горизонтальная нагрузка в боковые поверхности буксовых проемов с максимальной силой  $1,5 \cdot 10^5$  Н. Вертикальная нагрузка прикладывается к опорной поверхности рессорного проема. Вертикальная сила давления составляет  $5,7 \cdot 10^5$  Н и обеспечивает напряжение большинства участков детали (за исключением внешних углов буксовых проемов).

Для диагностики всей надрессорной балки при продлении ресурса или инспекционном контроле на ней устанавливают 12 ПАЭ в соответствии с рисунком 6.3. На детали выделены 12 значимых плоских зон контроля ввиду коробчатой формы детали. Надрессорная балка нагружается до  $7,2 \cdot 10^5$  Н вверх и  $6,4 \cdot 10^5$  Н вниз так, что нагружение представляет собой трехточечный изгиб детали.

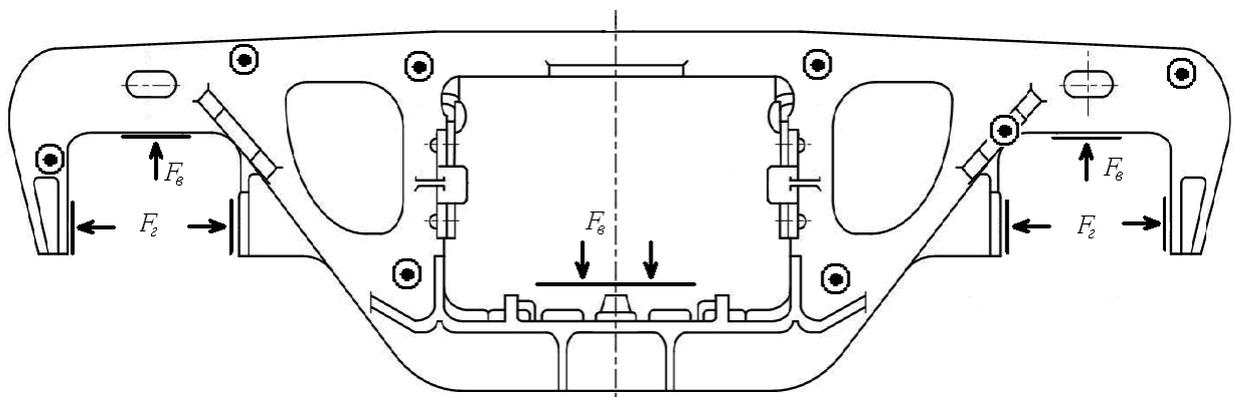
Следует отметить, что как для надрессорных балок, так и для боковых рам все используемые зоны сведены к плоскому виду, это позволяет в каждом случае проводить локацию источников по трем первым зарегистрировавшим сигнал ПАЭ, а следующий по порядку приема сигнал использовать для оценки погрешности определенных координат.

При настройке основных параметров контроля, таких как частотный диапазон фильтрации, порог чувствительности аппаратуры, исходят не только из обеспечения высокого уровня чувствительности, но и из минимизации погрешностей при определении координат источников.

а)



б)



в)

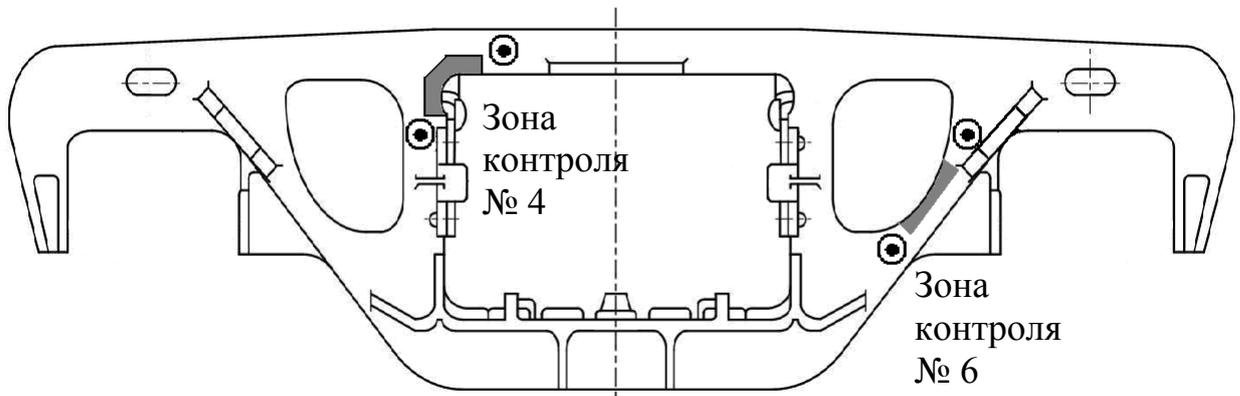


Рисунок 6.2 – Схемы установки преобразователей на боковые рамы таврового сечения в буксовом проеме (а) и коробчатого сечения в буксовом проеме (б, в) для диагностики состояния всей детали (а, б) и отдельных участков (в)

Например, экспериментальным путем установили, что уровень шумов каналов при их установке на литые детали тележек в условиях ремонтных предприятий колеблется в диапазоне 5...15 мВ. Эти значения вызваны собственными шу-

мами каналов, электрическими и механическими помехами, возникающими в производственных условиях. Поэтому минимальный порог чувствительность целесообразно устанавливать не менее чем на 6 дБ выше максимального уровня шумов – в данном случае 30 мВ в абсолютных единицах

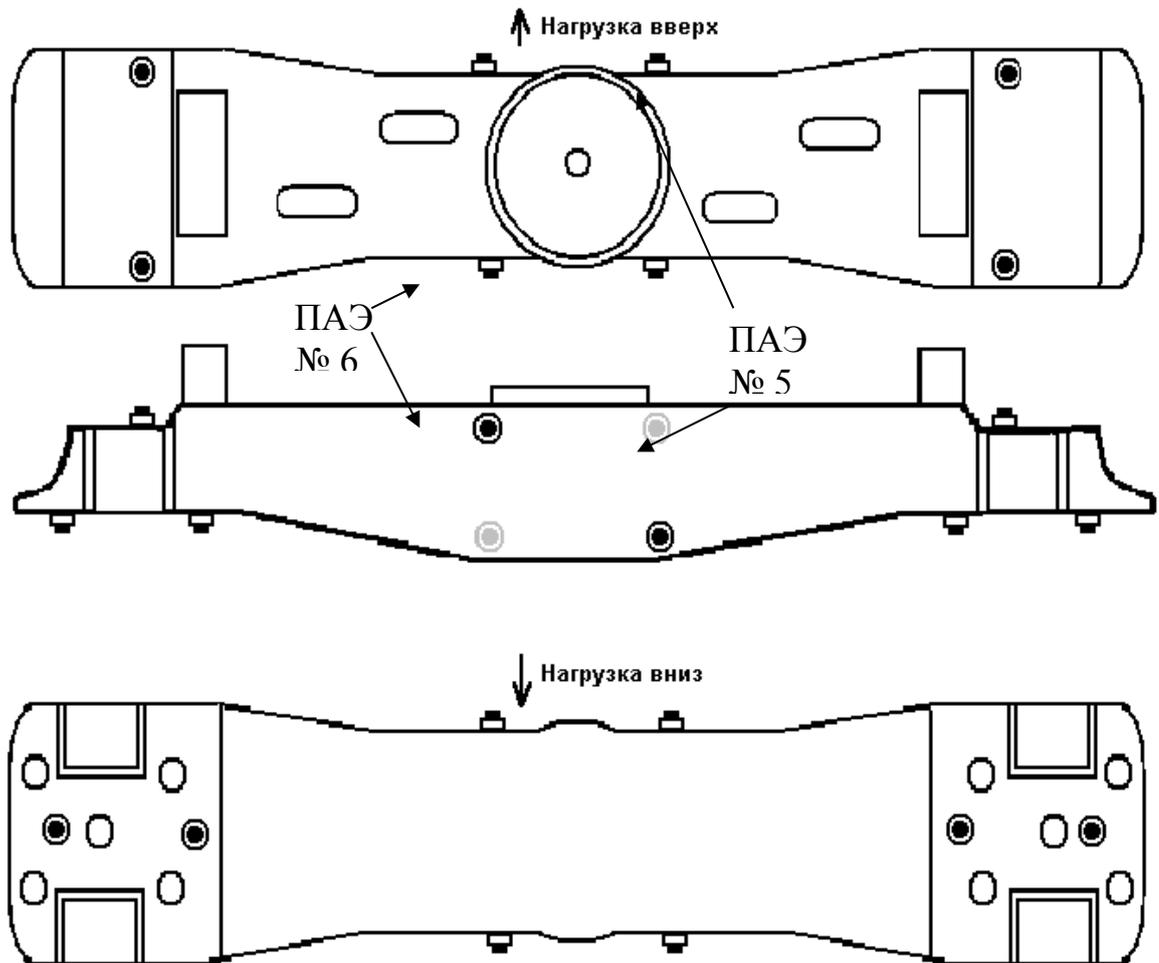


Рисунок 6.3 – Схема установки приемных преобразователей АЭ для контроля надрессорной балки

Исследования зависимости относительной погрешности значений координат сигналов АЭ от амплитуды принятого сигнала при локации источника с известным местоположением на боковой раме по одной из координат (см. рисунок 6.2) показывает, что снижение порогового уровня оценки может приводить к существенному возрастанию погрешности, а значит, и идентификации источников. При испытаниях значение скорости ультразвуковой волны принимали равным 4 000 м/с, как наиболее оптимальное – среднее значение этого параметра по зара-

нее известным значениям расстояний от источника до приемников и пороговым уровнем фиксации по амплитуде – 16 дБ относительно максимально допустимого уровня собственных шумов каналов (5 мкВ). При изменении задаваемой скорости среднее значение погрешности возрастает.

Дополнительно для отслеживания уровня шумов и их влияния на точность определения координат источников АЭ использовали методику контроля уровня непрерывной АЭ в процессе испытаний, предложенную в патенте [254].

По полученным результатам оценки погрешности видно, что определение координат источников по сигналам с амплитудой ниже 20 дБ относительно выбранного уровня фиксации приводит к увеличению относительной погрешности измерений свыше 20...25 %, что в практике контроля недопустимо. Аналогичные результаты получены при оценке погрешностей измерения координат источников АЭ материала на надрессорной балке. Поэтому значение 20 дБ выбрано в качестве порогового для основного уровня оценки параметров сигналов АЭ. Но при контроле отдельных участков пьезоантенны геометрически меньше, а зона потенциального источника обычно находится в центре зоны, где точность измерения координат выше, поэтому в данном случае можно использовать сниженный уровень оценки сигналов АЭ.

Основные настраиваемые параметры приемного тракта системы АЭ определены на основании многочисленных экспериментальных данных, приведенных в работах [15, 259–261], и сведены в таблицу 6.1. В таблице учтены три возможных варианта диагностики деталей.

При выборе скорости нагружения руководствовались экспериментальными исследованиями активности сигналов АЭ различного происхождения. Наибольшую активность показывают источники в виде наплавленных участков или участков, отремонтированных сваркой при контроле непосредственно после такого вида ремонта. Более того, высокая активность АЭ, наблюдаемая на участках наплавки, зависит от местоположения этого участка, например, активность АЭ из наплавленного участка в технологических окнах боковой рамы и надрессорной балки, верхней и боковой плоскостях надрессорной балки лишь немногим пре-

вышает активность некоторых участков контроля при продлении ресурса. А при контроле наплавленных подпятников, приваренных в новых наклонных плоскостях надрессорной балки, наплавленные опорные поверхности буксовых проемов боковых рам имеют самый высокий потоковый уровень сигналов (до 200 1/с при скорости нагружения 10 кН/с, а в отдельных случаях и выше), отнесенный к скорости нагружения. В таких случаях скорость нагружения следует уменьшать, так как появляется большая вероятность пропуска сигнала АЭ системой.

Таблица 6.1 – Параметры настройки системы СЦАД 16.03 при АЭ диагностике литых деталей тележки

Параметры настройки	Решаемые задачи АЭ методом		
	Определение ресурса и контроль всей детали	Контроль качества сварки и наплавки (после ремонта)	Контроль отдельных участков (в том числе опорных поверхностей под износостойкими накладками)
Частотный диапазон, кГц	100...400	100...500	100...400
Минимальный порог срабатывания уровня фиксации, мкВ	25	25	25
Порог срабатывания уровня оценки, дБ	20	20	10
Скорость нагружения, кН/с	10	2...5	5
Максимальное время нарастания сигнала, мкс	300	300	100
Максимальное расстояние между ПАЭ пьезоантенны, м	0,7...1	0,5	0,3

Требования к чувствительности преобразователей таково, что принимаемые имитационные сигналы должны быть в диапазоне превышения порога срабатыва-

ния на 30...40 дБ для приемных ПАЭ, находящихся на расстоянии менее 500 мм от источника имитационных сигналов. Остальные ПАЭ должны принимать сигналы с соответствующей амплитудой, учитывающей то, что ультразвуковые волны в рабочем диапазоне частот имеют затухание 8...18 дБ/м. Регулировка чувствительности проводится с помощью корректировки значения коэффициента усиления основного усилителя системы.

При контроле отдельного участка любой детали преобразователи обычно устанавливаются в углы простой прямоугольной пьезоантенны со сторонами 150...250 мм. Уменьшение или увеличение расстояний между преобразователями не рекомендуется, так как в этом случае возрастает погрешность определения координат источника. Кроме того, уменьшение размеров пьезоантенны с учетом указанного коэффициента затухания позволяет в этом случае снизить значение порога срабатывания уровня оценки на 10 дБ, что повышает чувствительность контроля.

Далее следует решить следующие актуальные задачи, существенно повышающие достоверность метода АЭ контроля боковых рам и надрессорных балок:

- анализ работоспособности новых критериев оценки, таких как коэффициент взаимной корреляции сигналов, суммарная энергия сигналов АЭ от источника, параметры, зависящие от стадии нагрузки;
- анализ параметров, определяющих необратимые изменения на участках, содержащих литейные дефекты с целью повышения объективности контроля таких участков;
- исследование поведения АЭ параметров на участках, содержащих следы сварки и наплавки, проводимых при ремонте, в которых возникают дополнительные источники АЭ;
- проведение испытаний и анализ поведения параметров АЭ различных дефектов при повторных испытательных нагружениях (до 10...20 циклов) с целью повышения достоверности контроля.

На первом этапе исследовали детали с источниками различного происхождения. Обобщенные данные использования методики АЭ-диагностики боковых рам с различными потенциально опасными участками приведены в таблице 6.2.

Как видно из таблицы 6.2, результаты контроля сравнивали с результатами магнитного и визуального контроля. В ряде случаев не удалось осуществлять контроль магнитным методом из-за высокой шероховатости данных участков и наличия магнитной неоднородности на границах основного и наплавленного металлов. Был проведен выборочный дополнительный магнитопорошковый или ультразвуковой контроль боковых рам с локализованными источниками сигналов АЭ после подготовки поверхности, позволяющей провести этот контроль, и большая часть дефектов была подтверждена.

Таблица 6.2 – Результаты контроля боковых рам

Виды дефектов	Забраковано разными методами, шт.	По методам контроля, шт.		
		АЭК	ФЗК	Визуаль- ный
Усталостные трещины	74	70	66	66
Заварка дефектных участков	115	19	–	115
Дефекты литья	95	6	91	93
Бездефектные, с отработанным ресурсом	67	4	–	–

Кроме боковых рам, разработанные алгоритмы контроля проверялись при испытаниях надрессорных балок (таблица 6.3). Дефекты в надрессорных балках, выявленные другими методами НК, в большинстве случаев методом АЭ, как активно развивающиеся источники не подтвердились. Дефекты литья, определенные методом АЭ, в дальнейшем нашли подтверждение при обследовании макрошлифов.

Таблица 6.3 – Результаты контроля надрессорных балок

№ п/п	Группы деталей	Проверено разными методами, шт.	Забраковано по методам контроля, шт.		
			АЭК	ФЗК	Визуальный
1	Усталостные трещины в наклонных плоскостях	21	18	10	16
2	Усталостные трещины на корпусе	3	3	2	2
3	Дефекты литья	16	2	10	11
3	Дефекты сварки	5	0	4	5
4	Бездефектные, с отработанным ресурсом	37	5	0	1

## 6.2. Анализ критериев оценки технического состояния литых деталей для акустико-эмиссионного метода

На первом этапе исследований анализировали поведение критериев оценки, выделенных в качестве значимых в третьей главе настоящей работы. Основные результаты исследований приведены в работах [8, 262–264].

Исследования проводили на двух группах деталей – боковых рамах коробчатого сечения в буксовом узле с пассивными источниками АЭ и без них. К пассивным источникам в данном случае относили дефекты, обнаруженные другими методами неразрушающего контроля: визуально-измерительным, МП, ФЗ. Степень опасности большинства таких дефектов определить этими методами было невозможно ввиду физических ограничений применяемых для контроля методов

неразрушающего контроля. В первой группе было 70 деталей, имеющих потенциально опасные участки, такие как литейные трещины, раковины, утяжины, поры, выходящие на поверхность, следы прижогов от сварки, локальные магнитные неоднородности, участки локального уменьшения толщины детали в наиболее нагруженных местах (внутренний угол буксового проема). Следует отметить, что действующая нормативная документация по оценке состояния таких деталей [177, 180] предписывает большинство исследованных дефектов браковать. Эту группу боковых рам исследовали на первом этапе эксперимента. Вторая группа состояла из 170 боковых рам, не имеющих явных пассивных источников АЭ с целью оценки влияния помеховых факторов на результаты контроля.

При испытаниях внимание уделяли режиму нагружения, так как литые детали имеют достаточно высокий уровень собственных шумов. Под такими шумовыми сигналами следует понимать:

- сигналы, связанные с трением элементов нагружающего устройства о деталь, трением элементов конструкции (например, не демонтированных фрикционных планок, износостойких накладок на опорной части буксового проема);
- пластические деформации наплывов, смещений металла около рисок и элементами нагружающих устройств, через которые передаются усилия на деталь;
- отслаивание окалины, брызг сварки и т. п. под воздействием повышенных нагрузок.

Первый вид помеховых сигналов проявляется на стадии достаточно малых нагрузок, как правило, меньше  $0,5P_{исп}$ . Помеховые сигналы второго вида распределяются во всём испытательном времени, а третьего в основном на стадии превышения  $P_{исп}$  рабочей нагрузки. Общий уровень помеховых сигналов составляет 80...100 % от суммарного счета  $N$  регистрируемых системой сигналов АЭ для каждой детали и составляет  $N = 100...5\ 000$  в зависимости от состояния детали, уровня настроек АЭ системы и т.п.

Для отстраивания от первого и частично второго вида помеховых сигналов на первом этапе нагружения делают опрессовку, т.е. дают до 20 % испытательной

нагрузки, что позволяет существенно снизить уровень шумов на начальном этапе нагружения. С остальными помеховыми сигналами на стадии нагружения бороться невозможно, их приходится записывать вместе с полезными сигналами. Детальное предварительное изучение помеховых сигналов позволяет выделять их на стадии обработки, используя программные методы фильтрации.

Контроль проводили при механическом нагружении нагрузкой, имитирующей статическую. Максимальная испытательная нагрузка превышала эксплуатационную динамическую на  $20 \pm 5$  % и обеспечивала последовательное нагружение в два этапа сначала горизонтальной нагрузкой  $F_{г}$ , а затем вертикальной нагрузкой  $F_{в}$ . На каждую деталь устанавливали 12 преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). При этом в ходе экспериментов установили, что особую важность играет точность координат преобразователей, устанавливаемых в области буксовых проемов, где преобразователи следует располагать с погрешностью не более 20 мм по каждой координате.

Чувствительность ПАЭ устанавливали с помощью электронного имитатора так, чтобы минимальная амплитуда на приемных ПАЭ на расстоянии 500 мм от источника была не менее 0,03 от генерируемой имитатором с учетом двойного преобразования. Амплитуда собственных шумов каналов ПАЭ не превышала 5 мкВ. Суммарный коэффициент усиления каждого канала в зависимости от чувствительности колебался в диапазоне 250...2 000. Другие параметры записывающей аппаратуры при АЭ диагностике боковых рам были следующими:

- частотный диапазон – 100...400 кГц;
- минимальный порог срабатывания уровня регистрации – 6 дБ;
- порог срабатывания уровня оценки – 20 дБ;
- скорость нагружения – 10 кН/с;
- максимальное время нарастания сигнала – 300 мкс;
- максимальное расстояние между ПАЭ пьезоантенны – 0,7...1, м.

Во всех случаях нагружения при достижении максимальной нагрузки продолжали регистрацию сигналов АЭ до снижения активности АЭ не менее чем в 10 раз, но не менее 1 мин.

### 6.2.1. Анализ потоковых параметров от активных источников

Основными регистрируемыми параметрами каждого выделенного источника АЭ были:

$N$  – число зарегистрированных из локальной области (смежных ячеек) сигналов АЭ;

$A_{\text{ср}}$  – средняя амплитуда сигналов от источника, зафиксированная ближайшим к нему ПАЭ в абсолютных единицах с учетом уровня селекции в 30 мкВ без учета усиления сигналов предварительным и основным усилителями;

$N_m$  – число зарегистрированных из локальной области (смежных ячеек) сигналов АЭ, амплитуда которых превысила порог срабатывания на 20 дБ и более;

$K_p$  – приведенный коэффициент нагрузки для сигналов АЭ из локальной области источника, определяемый по формуле

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_{\text{max}}}}{N}, \quad (6.1)$$

где  $P_i$  – нагрузка, при которой был зарегистрирован  $i$ -й сигнал от источника;  $P_{\text{max}}$  – максимальная испытательная нагрузка.

Следует отметить, что установленный уровень чувствительности соответствовал тому, который можно реализовать на практике при контроле на ремонтном предприятии. Этот уровень чувствительности в совокупности с параметрами пьезоантенны позволяет локализовать источники, излучающие сигналы, мощность которых примерно в 10...50 раз выше, чем можно добиться в лабораторных условиях. Однако этот уровень позволяет надежно регистрировать сигналы от приращения трещин [226, 227, 265].

Примерно в половине испытаний потенциальные источники сигналов АЭ, т. е. обнаруженные другими методами НК неоднородности и дефекты, выходящие на поверхность детали, излучили менее трех сигналов (16 случаев) – I класса или вообще не излучили зарегистрированные АЭ системой сигналы (18 случаев). Эти дефекты как источники АЭ признаны неактивными по результатам контроля.

Данные по деталям, на которых от литейных дефектов зарегистрировано наибольшее число сигналов АЭ (более десяти), приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Параметры АЭ наиболее активных источников АЭ

№ детали	Причина браковки другими методами	Параметры АЭ из области источника			
		$N$	$A_{cp}$ , мкВ	$N_m$	$K_p$
10973	Продольная трещина в углу внутренней части буксового проема	31	545	0	0,73
569557	Литейная раковина во внутренней поверхности внутреннего угла буксового проема	25	426	0	0,79
19568	Раковина во внутреннем углу во внутренней части буксового проема	16	1 220	1	0,41
29462	Литейная раковина во внутреннем углу во внутренней части буксового проема	15	619	0	0,74
29114	Пористость во внутреннем углу буксового проема	12	1 648	2	0,84
59078	Литейная раковина во внутренней поверхности внутреннего угла буксового проема	12	907	0	0,44
6492	Продольная утяжина в углу внутренней части внутреннего угла буксового проема	12	609	0	0,8
35797	Поперечная трещина в углу внутренней части буксового проема	9	784	1	0,72
60037	Литейный дефект во внутреннем углу во внутренней части внутреннего угла буксового проема	12	651	0	0,42

Окончание таблицы 6.4

№ детали	Причина браковки другими Методами	Параметры АЭ из области источника			
		$N$	$A_{cp}$ , мкВ	$N_m$	$K_p$
69925	Поперечная трещина в углу внутренней части буксового проема	14	578	0	0,56
T91013	Продольная трещиновидная утяжина в углу внутренней части буксового проема	9	589	0	0,87
7375	Пористость на внутренней поверхности опорной части буксового проема	8	887	1	0,74
70534	Следы сварки во внешнем углу буксового проема	8	577	0	0,17

Как видно из приведенных в таблице 6.4 данных, большинство представленных активных источников АЭ в боковых рамах имеют достаточно большой разброс таких параметров, как  $A_{cp}$  и  $K_p$ . С учетом невысокого рассчитанного коэффициента интенсивности напряжения, даже при наличии зарождающейся или растущей на литейных дефектах трещины во всех описанных случаях можно говорить о том, что источник находится на стадии низких скоростей роста трещины [232]. И эти значения достигаются только при высоких нагрузках, когда  $\frac{P_i}{P_{max}} \geq 0,8$ .

Кроме того, исходя из данных исследования поведения источников АЭ в литых деталях при статической нагрузке [265] можно сделать выводы, что критерий  $K_p$  является весьма важным при установлении факта развития дефекта в ходе испытаний.

Две из представленных деталей имеют низкий средний коэффициент нагрузки. Например, у источника боковой рамы № 19568 в диапазон  $0,8 \geq \frac{P_i}{P_{max}} \geq 1$

попадает всего один сигнал АЭ, а источники боковой рамы № 60037 или № 59087 имеют в этом диапазоне нагрузок существенно меньшее число зарегистрированных импульсов АЭ (рисунок 6.4) по сравнению с деталями, у которых подавляющее большинство сигналов регистрировали при нагрузках, превышающих максимальную рабочую.

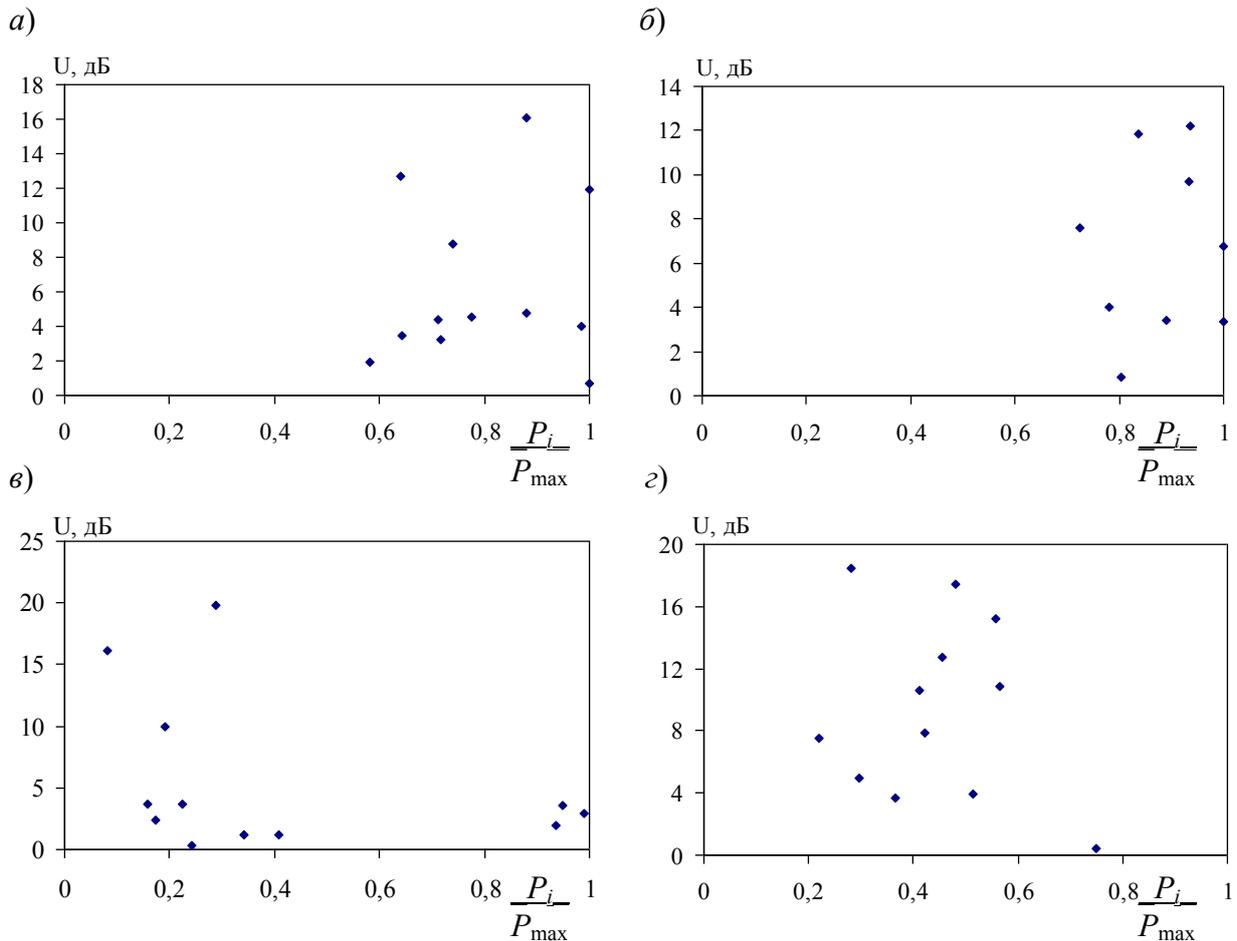


Рисунок 6.4 – Амплитудное распределение сигналов АЭ в зависимости от величины нагрузки для боковых рам № 6492 (а) № Т91013 (б) с источниками, активными при больших нагрузках, и для боковых рам № 60037 (в), № 59087 (з) с источниками, активными до достижения максимальной рабочей нагрузки

Проведенный анализ позволяет говорить о том, что причинами излучения волн АЭ для этих деталей может быть трение берегов дефекта либо процессы, не связанные с развитием дефекта, например отслаивание слоя окалины, шлаков на поверхности объемного литейного дефекта. В то же время большинство источни-

ков, у которых  $K_p > 0,5$ , имели подавляющее большинство сигналов в области высоких нагрузок при высоких значениях напряжений.

Таким образом, использование при анализе зарегистрированных сигналов от источников при статических испытаниях реальных деталей учета величины нагрузки, при которой зарегистрированы сигналы, позволяет их разделить на три подгруппы:

- 1) источники, излучающие импульсы АЭ при низких нагрузках;
- 2) источники, излучающие импульсы АЭ как при низких, так и при высоких нагрузках;
- 3) источники, излучающие импульсы АЭ при высоких нагрузках (выше  $0,8P_{\text{раб}}$ ).

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

Источники второй группы – это развитые трещины, источником 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 их, 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.

Очевидно, вторая группа может иметь наложение источников обоих этих типов, в частности, результаты контроля боковой рамы № 60037 свидетельствуют об этом. Пример результатов контроля боковой рамы № 69925 приведен на рисунке 6.5. На панели визуализации локализованных источников при вертикальном нагружении боковой рамы № 69925 показано присутствие активного источника во внутреннем углу буксового проема на фоне сигналов из достаточно обширной об-

ласти присутствия сигналов, связанных с изменениями на поверхности детали в той же области. Однако использование аналитического способа локации источников и анализ амплитудного распределения позволил выделить развивающийся активный источник и забраковать деталь по его наличию.

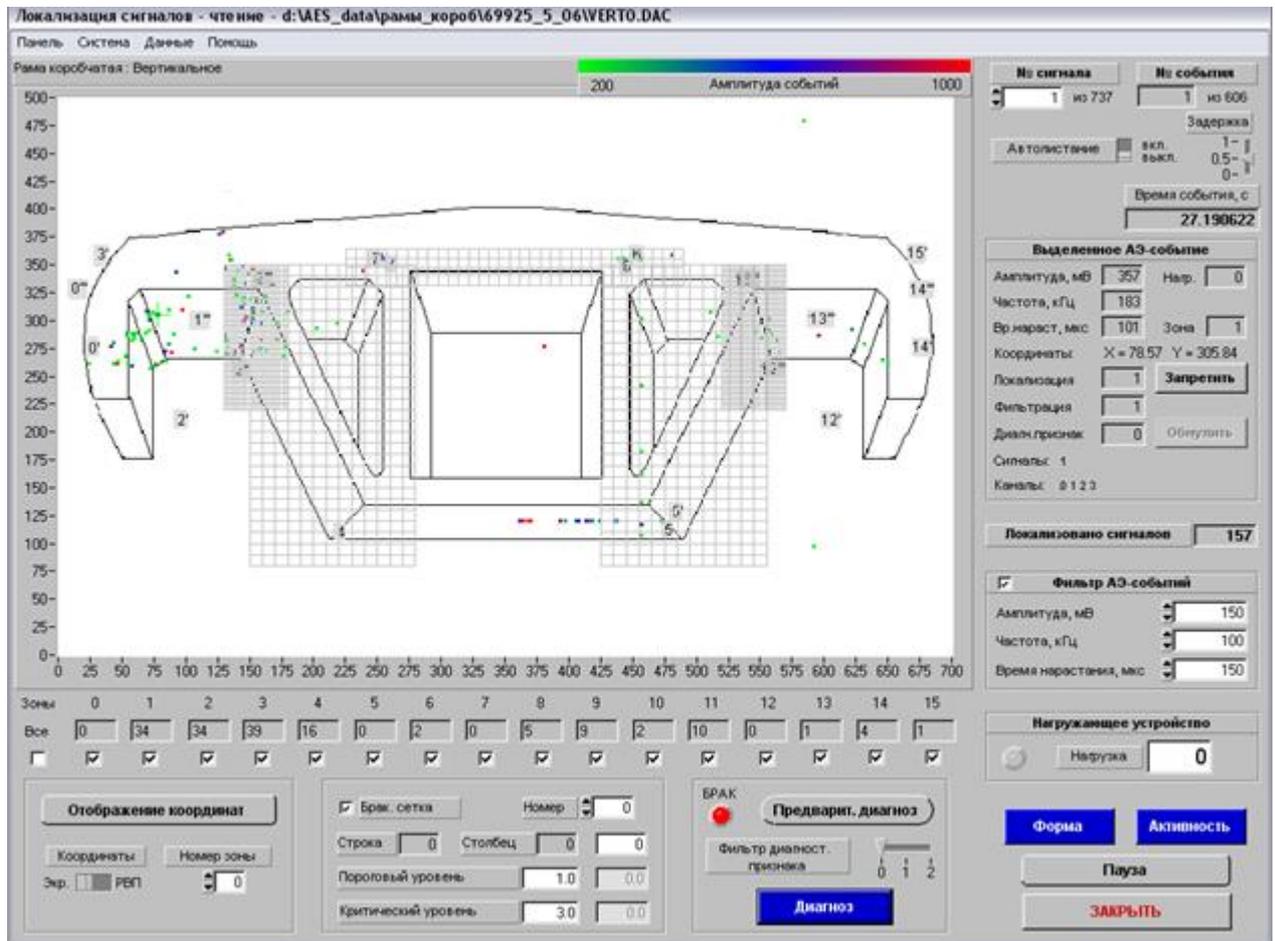


Рисунок 6.5 – Результаты контроля боковой рамы № 69925 с выделенной сеткой идентифицированного активного источника АЭ

### 6.2.2. Анализ поведения коэффициента корреляции у различных источников акустической эмиссии в литых деталях

Для разделения источников различных типов использовали корреляционный анализ сигналов АЭ, описанный в работе [227], и повторное нагружение объектов, идентичное по характеристикам первому нагружению, предполагая, что развивающиеся дефекты типа трещин являются источниками, на которых нарушается эффект Кайзера.

Корреляционный анализ показал, что только четыре детали (№ 29462, 29114, 35797, 69925) имеют относительно высокий средний коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника, который определяли, усредняя коэффициенты взаимной корреляции пар сигналов от источника  $k_{ij}$ , рассчитанные по формуле (4.6).

Средний коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника в боковой раме № 29462 составил 0,36, а колебание значений  $k_{ij}$  было в пределах от 0,15 до 0,94. Источник боковой рамы № 29114 имел среднее значение коэффициента корреляции – 0,46, а для различных пар сигналов колебался в пределах 0,14...0,94.

Для всех остальных источников в других деталях средний коэффициент взаимной корреляции сигналов был не выше 0,2, а максимальные значения  $k_{ij}$  выше 0,5 отмечены лишь для отдельных пар сигналов.

Анализ результатов повторных нагружений показал, что во всех случаях приложения повторной нагрузки, как к деталям, в которых были зарегистрированы источники, так и для деталей без источников АЭ, не наблюдали увеличения ни одного параметра АЭ из рассмотренных (число импульсов, суммарная энергия источника, его активность). Как правило, зафиксированные при первом нагружении источники при повторном нагружении излучали существенно меньшее число сигналов АЭ (не более четырех для восьми случаев) и с меньшей  $A_{cp}$ . Кроме того, во всех случаях излучающих источников при втором нагружении  $K_p$  был выше 0,7, в том числе для деталей, у которых при первом нагружении этот параметр был существенно ниже.

Методику разделения сигналов из локальных участков воздействия нагружающего устройства применили для идентификации источников в боковых рамах и надрессорных балках грузовых вагонов при продлении их остаточного ресурса. Экспериментальная выборка составила 50 боковых рам и 30 надрессорных балок.

Обработка результатов 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 боко-

вой рамы или верхняя часть наклонных плоскостей и подпятник надрессорных балок) выделить из потока ложных сигналов от воздействия нагружающего устройства «полезные» сигналы с относительно высоким  $k_{ij}$ . Как показали дальнейшие исследования этих участков – в них находились несплошности с развивающимися источниками АЭ. Примеры такого источника до и после фильтрации сигналов по коэффициенту корреляции представлены на рисунке 6.6.

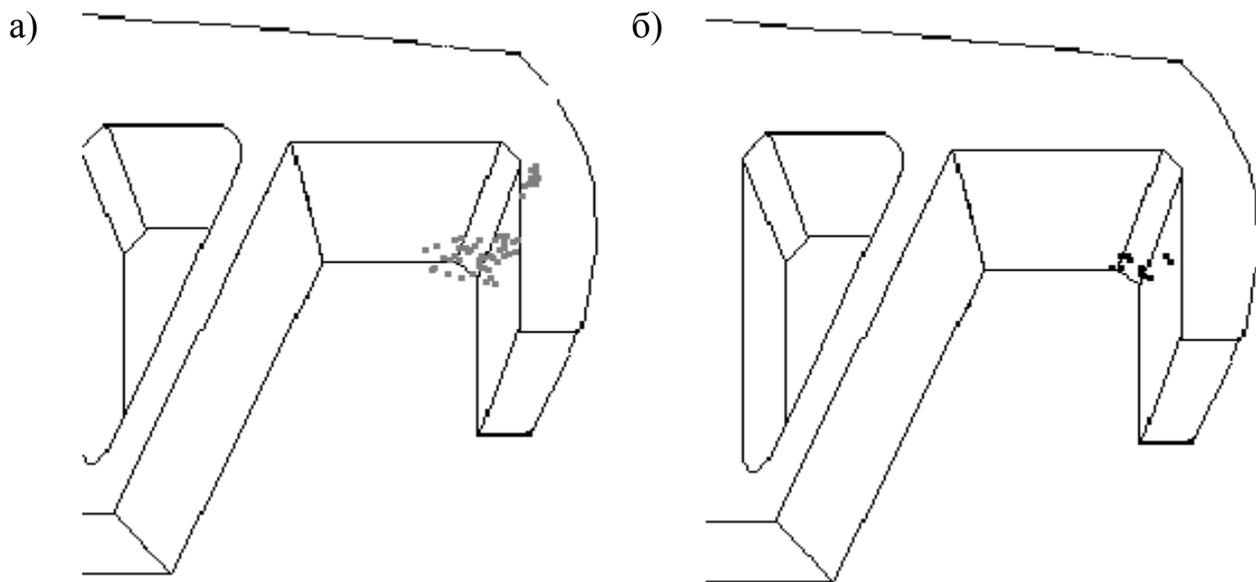


Рисунок 6.6 – Локализованные сигналы в области развивающегося дефекта без фильтрации сигналов от воздействия нагружающего устройства (а) и выделенные корреляционным методом сигналы от развивающейся трещины (б)

Полученные данные позволяют их использовать в автоматическом режиме, что облегчает работу дефектоскопистов при интерпретации и оценке результатов диагностики.

Дополнительный неразрушающий контроль магнитными методами в местах локации источников (ФЗ и МП, там, где эти методы можно было применить по наружным поверхностям деталей) не показал наличие трещин и других неоднородностей, соответствующих обнаруженным источникам АЭ.

Кроме того, был проведен выборочный долотом и анализ полученного излома, представленный на рисунке 6.7, который показал наличие развивающейся усталостной трещины в области зарегистрированного активного источника АЭ, сред-

ний коэффициент взаимной корреляции между сигналами от которого превышает 0,7.

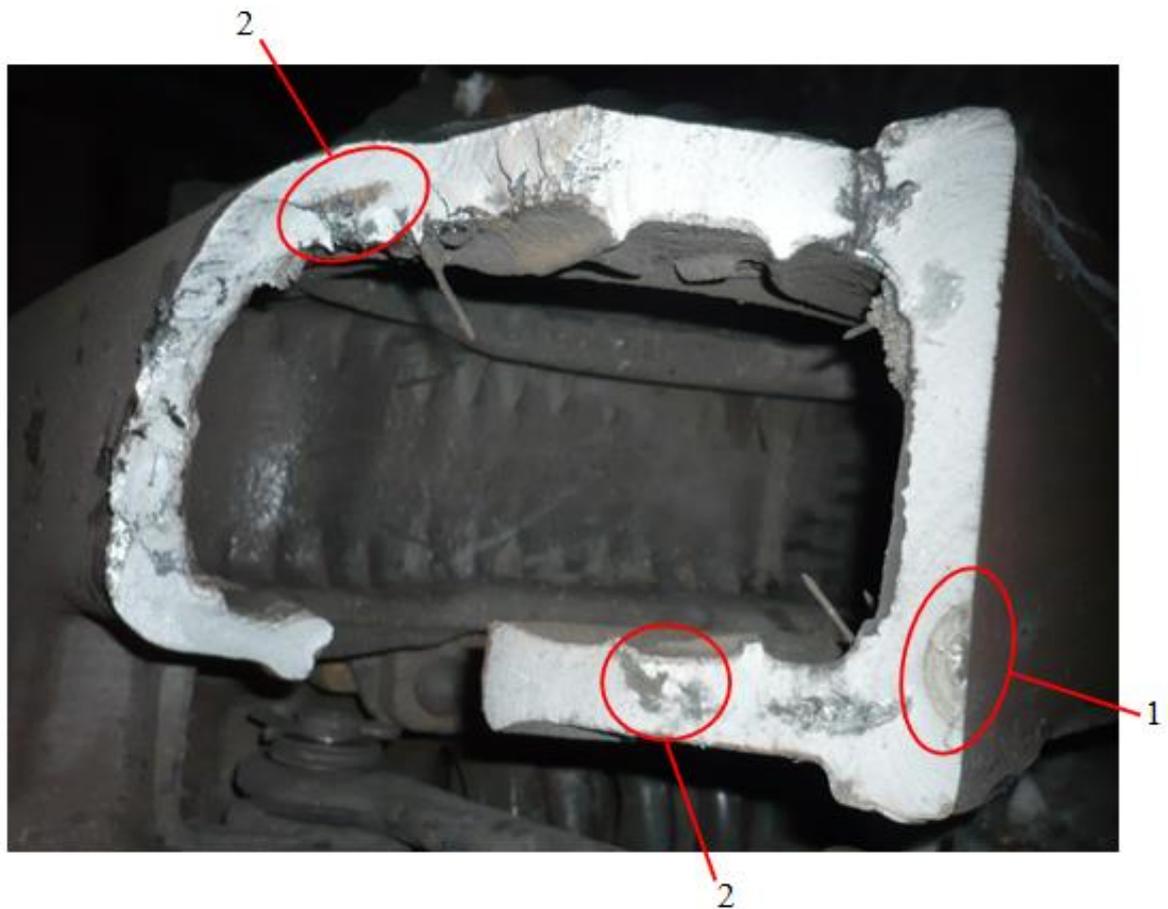


Рисунок 6.7 – Излом боковой рамы коробчатого сечения № 35797, где 1 – зона усталостного роста трещины, 2 – литейные дефекты

### 6.2.3. Исследование изменения суммарной энергии сигналов акустической эмиссии активных источников

Основным оцениваемым энергетическим параметром была суммарная энергия источника за время статического испытательного нагружения детали, которую определяли по формуле (3.24). Анализ каждого источника проводили с точки зрения оценки коэффициента корреляции соответствия динамики увеличения суммарной энергии АЭ источника формуле (4.6).

На рисунке 6.8 представлена зависимость изменения суммарной энергии сигналов АЭ (кривая 1) и изменение суммарного счета сигналов АЭ (кривая 2) от

нагрузки  $F_i$  от одного из источников в зоне наплавленного слоя подпятника надрессорной балки.

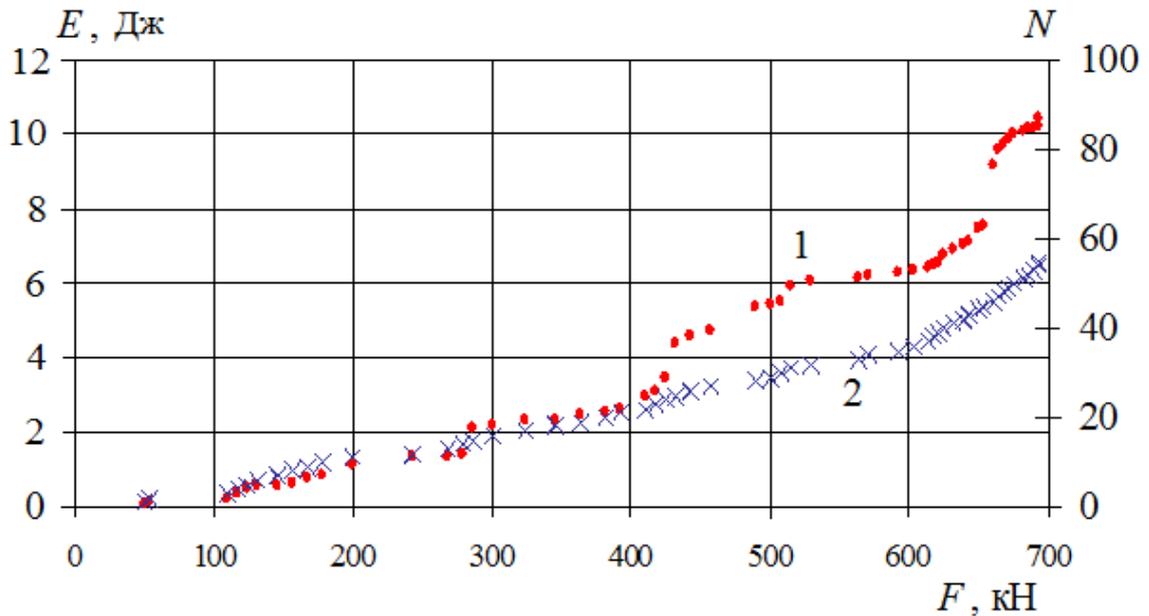


Рисунок 6.8 – Зависимость суммарной относительной энергии (1) и суммарного счета сигналов АЭ (2) от величины механической нагрузки в надрессорной балке № 22960

Наиболее активные источники АЭ излучают сигналы, суммарная энергия которых прирастает по степенной зависимости с показателем степени в диапазоне 1,5...2, что подтверждено измерениями размеров трещин и расчетом максимальных напряжений в вершине трещины. Исследованные трещины находятся на стадии роста, соответствующего напряжению между пределом выносливости и предела текучести материала, что подтверждает работоспособность этого критерия для литых деталей тележки грузового вагона. Вместе с тем этот критерий, к сожалению, не всегда может быть использован в силу необходимого числа информативных сигналов более пяти. В этом случае целесообразно оценивать низкоамплитудные сигналы, зафиксированные ближайшим к источнику приемным преобразователем.

Следует отметить, что кроме сосредоточенных источников типа трещин в литых деталях приходится иметь дело с распределенными источниками типа область пластической деформации, поверхность поврежденная коррозией и др. Для

таких источников были разработаны дополнительные критерии оценки с использованием:

- динамической активности сигналов АЭ:

$$dA = \frac{\Delta N}{\Delta F}, \quad (6.2)$$

где  $\Delta N$  – число зарегистрированных сигналов АЭ в интервале изменения нагрузки  $\Delta F$ ;

- плотности суммарной энергии, как аналога интегрально-динамического критерия, приведенного в [10], которая определяется по формуле

$$E_V = \frac{E}{V}, \quad (6.3)$$

где  $V$  – объем металла, характеризующий изменение структуры материала ОК.

В результате АЭ испытаний деталей с наплавленными и заваренными участками и разработке алгоритмов контроля появилась возможность оценивать общее состояние участка сварки и прилегающего металла, испытавшего термическое воздействие.

Использование дополнительных параметров АЭ, таких как коэффициент взаимной корреляции сигналов, приведенный коэффициент нагрузки для сигналов АЭ, дополнительные коэффициенты связи роста суммарной энергии от увеличения нагрузки, учет низкоамплитудных единичных сигналов от приемника, позволяет более надежно выделять развивающиеся области локальной динамической перестройки структуры на литейных дефектах и на участках с наплавленным слоем в литых деталях грузовых вагонов.

### **6.3. Методика идентификации источников акустической эмиссии на литейных дефектах в литых деталях**

По действующей нормативной документации [177, 181] литейные дефекты, выходящие на поверхность и имеющие глубину более 7 мм, требуют ремонта либо браковки литых деталей. А для литых деталей, отработавших срок более 30 лет, наличие некоторых поверхностных литейных дефектов глубиной более 2...3 мм является критерием браковки.

Литейные дефекты являются классическими потенциальными источниками АЭ, если на них не развиваются усталостные дефекты, то их можно относить к классу пассивных. Для литейных дефектов, как и для большинства макродефектов – источников АЭ, можно предположить два основных типа локальных зон формирования сигналов АЭ. К первому из них можно отнести участки локальной упругой и пластической деформации в зоне повышенного напряженно-деформированного состояния, вызванного ослаблением сечения детали литейным дефектом. Вторым типом источника можно считать формирующуюся или растущую усталостную трещину на литейном дефекте.

Для оценки состояния литейных дефектов и их потенциальной опасности провели исследования на деталях, на которых были обнаружены литейные дефекты, выходящие на поверхность или находящиеся близко к поверхности и обнаруженные магнитными методами неразрушающего контроля. Всего было исследовано более 250 боковых рам и надрессорных балок тележки грузового вагона с выходящими на поверхность литейными раковинами, утяжинами, неслитинами подповерхностными литейными дефектами, обнаруженными магнитными методами неразрушающего контроля.

Методика проведения контроля предусматривала нагружение деталей испытательной нагрузкой, превышающей рабочую на  $25 \pm 5$  % в специализированных нагружающих устройствах, обеспечивающих трехточечный изгиб. Средняя ско-

рость роста усилия нагрузки составила – 15 кН/с. На участке с каждым литейным дефектом устанавливали пьезоантенну из четырех широкополосных преобразователей АЭ. Функциональные особенности и принципы работы использованной для диагностики регистрирующей АЭ системы СЦАД 16.03 и методика контроля боковых рам и надрессорных балок подробно описаны в работах [8, 15].

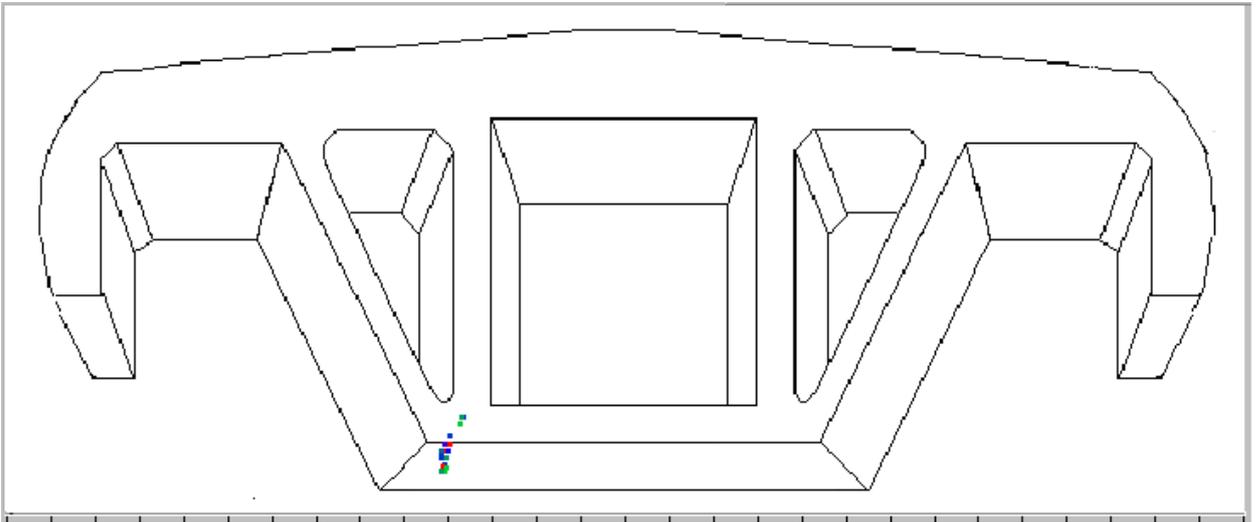
Результаты АЭ контроля литых деталей показывают, что около 10 % литейных дефектов имеют активные источники АЭ. Примеры данных АЭ контроля источников различного вида приведены на рисунке 6.9. В остальных деталях эти источники были признаны пассивными. У некоторых из них наблюдались единичные сигналы АЭ из области литейных дефектов (не более двух сигналов за время испытаний). Кроме того, активные источники разделены на две группы по дополнительным производным параметрам АЭ. К первой отнесем литейные дефекты – активные источники без явных признаков необратимых изменений материала. Ко второй группе относятся активные источники с параметрами АЭ, эквивалентными значениям, возникающим при необратимых деформациях в разрушающемся материале по исследованиям, описанным в работе [265].

Рассмотрим сравнительные характеристики источников обоих типов. На рисунке 6.10 представлено изменение роста суммарного счета  $N_{\Sigma}$  от локальных источников АЭ при изменении текущего значения нагрузки  $F_i$  к максимальному значению этого параметра  $F_{\max}$  на боковых рамах (а) и надрессорных балках (б), где нагрузки до  $\frac{F_i}{F_{\max}} \leq 0,8$  соответствуют рабочим.

Основными отличительными особенностями локальных областей, испытывающих превращения при необратимых упругих или пластических деформациях и выступающих источниками АЭ, является то, что области деформации занимают немалую часть и статистически координаты таких источников показывают достаточно большую зону локации. А учитывая то, что микроисточники названных областей находятся на расстоянии друг от друга, то волновые пакеты таких источников в области упругих напряжений (за пределы которых для таких источников обычно испытания не выходят) имеют и относительно невысокий уровень ампли-

туды и энергии сигналов, и низкий коэффициент взаимной корреляции между сигналами.

a)



б)

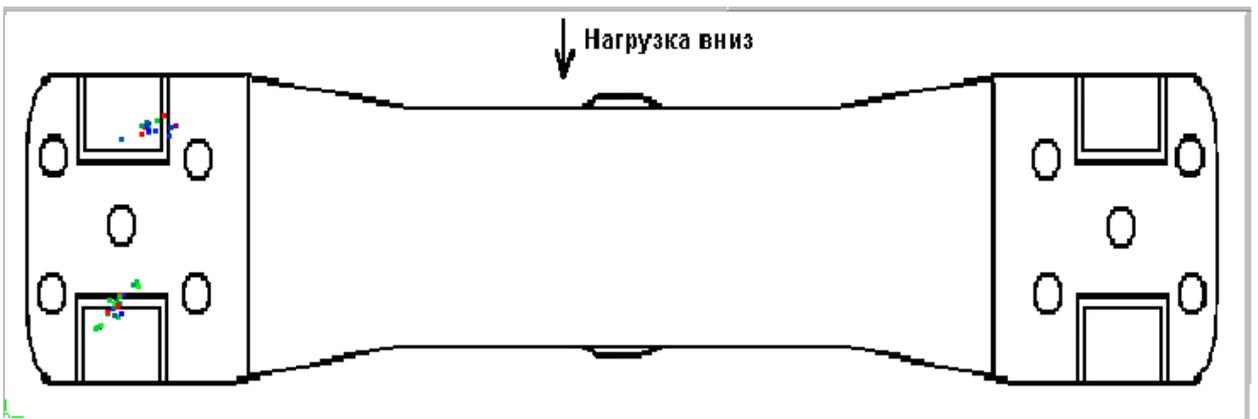


Рисунок 6.9 – Результаты локации источников на литейных дефектах во внутренней нижней части технологического окна боковой рамы № 3113 (a) и в наклонных плоскостях надрессорной балки № 26663 (б)

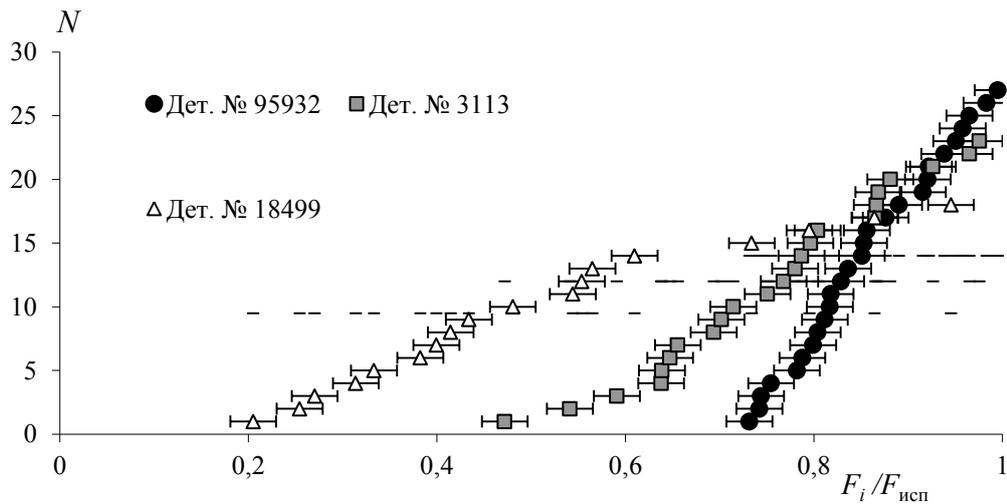
Внешне общие результаты локации различного вида источников из области нахождения литейных дефектов практически не отличаются, обладают достаточно высокой геометрической скученностью и несколько отличаются динамикой изменения счета АЭ при относительном к максимальному значению нагрузки

$$\frac{F_i}{F_{\max}}$$

Из полученных данных наиболее интересные результаты отражены при нагрузках выше значений относительно нагрузки – 0,6, когда они приближаются к

рабочим и особенно часть выше 0,8, когда нагрузки превышают рабочие. Из приведенных данных видно, что, например, счет сигналов от источников АЭ на боковых рамах № 3113 и № 95932 и на надрессорной балке № 26663 (см. рисунок 6.10) в эти интервалы времени существенно выше, чем для других деталей, что уже является фактором, разделяющим источники по степени их развития.

а)



б)

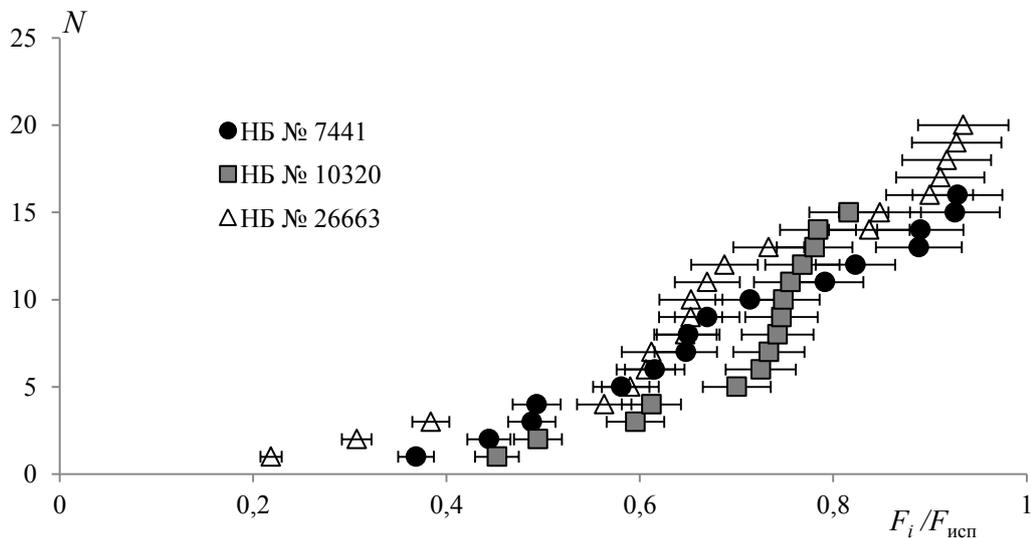


Рисунок 6.10 – Динамическое изменение суммарного счета  $N$  АЭ из областей развивающихся изменений на литейных дефектах в боковых рамах (а) и надрессорных балках (б) при изменении величины нагрузки

Тем не менее повышенная активность на заключительной стадии нагружения – весьма условный параметр, характеризующий локальные динамические из-

менения в материале при нагрузках, превышающих рабочие, т.е. в области дополнительного напряженно-деформированного состояния, и позволяющий разделить источники на те, для которых эффект Кайзера выполняется, и те, для которых он не выполняется. При этом источники по результатам дополнительного контроля локальных участков другими методами (визуальный, МП, ФЗ, ультразвуковой) можно разделить на три категории:

– если акты АЭ происходят только при малых нагрузках, это свидетельствует, как правило, о наличии ложного источника, например, отслаивание окалины, попавших на деталь транспортируемых материалов (таких как капли застывшего цемента) и т.п.;

– если акты АЭ происходят только при высоких нагрузках,  $\frac{F_i}{F_{\max}} > 0,6$ , то они,

как правило, относятся к зарождающейся трещине (подтверждающими металлографическими методами обнаруживаются микротрещины), участки пластической деформации, коррозии, в этом случае коэффициенты  $\Sigma k_{ij}$  и  $k_U$  выше значения 0,5 но не превышает 0,9, однако доля локализованных сигналов относительно сигналов принятых только ближайшим к источнику приемником мало, меньше 0,2;

– если же акты АЭ от источника наблюдаются как при малых, так и при больших нагрузках – они принадлежат сформировавшемуся очагу разрушений – усталостной трещине или участку устойчивой пластической деформации, такой как деформирование наплыва металла, образовавшегося в процессе эксплуатации, элементами нагружающего устройства, в этом случае параметр  $\Sigma k_{ij}$  может колебаться в больших пределах (от 0,2 до 0,9), а  $k_U$  всегда выше 0,9.

Для того чтобы оценить масштабы изменений в материале, произошедших в процессе испытаний, требуется анализ дополнительных энергетических характеристик источника. Более того, для повышения достоверности контроля целесообразно использовать несколько критериев оценки источников. Исходя из данных, приведенных в работах [218, 265], для развивающихся источников АЭ можно использовать такие критерии, как коэффициент взаимной корреляции разных сигнала-

лов от источника  $k_{ij}$ , среднеквадратичное отклонение амплитуды или энергии сигналов АЭ –  $D_E$ , активность АЭ источника.

Среднеквадратичное энергии сигналов АЭ от источника определяли по формуле

$$D_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_\Sigma} (E_i - \bar{E})^2}{N_\Sigma - 1}}, \quad (6.4)$$

где  $E_i$  и  $\bar{E}$  – энергия сигналов АЭ от источника и среднее значение энергии, определяемое по всем сигналам. Относительную активность источника рассчитывали как текущее значение по интервалу времени прихода пяти последовательных сигналов по формуле

$$\frac{dA}{dF} = \frac{N_i}{\Delta F_i}, \quad (6.5)$$

где  $\Delta F_i$  – интервал нагрузки относительный к максимальному испытательному значению;  $N_i$  – количество сигналов АЭ, пришедшее в этот интервал нагрузок. При обработке все время испытаний разбили на десять интервалов  $\Delta F_i$ . Это удобно потому, что легко можно определить визуально на графиках – при каких относительных нагрузках происходят всплески или падения активности АЭ. Если источник активен при нагрузках ниже 0,7, то очевидно, что:

- либо процесс деградации структуры очень интенсивен, а дефект развивается по сценарию катастрофического разрушения, но это приводит в любом случае к увеличению активности источника при еще больших нагрузках;
- при снижении активности на более высоких нагрузках – источник разрушения слабо связан с развитием одного дефекта, а вызван процессами, которые конечны при таких нагрузках, например, растрескивания окарины, покрывающей поверхность литейного дефекта или снятие локальных внутренних напряжений.

Далее определили количество сигналов из локальной области, имеющих  $k_{ij} > 0,5$ , и остальные описанные характеристики только для таких сигналов. Основные результаты по изменениям  $k_{ij}$  и  $D_E$  по данным контрольной выборки деталей с

обнаруженными источниками приведены в таблице 5.5, в которой  $N_{\Sigma}$  – суммарный счет АЭ от источника,  $k_{(ij)cp}$  – среднее значение коэффициентов корреляции сигналов от источника,  $k_U$  – коэффициент взаимной корреляции амплитуд заргитрированных двумя ближайшими к источнику приемниками,  $N_k$  – суммарный счет сигналов, уровень взаимной корреляции которых  $> 0,5$ .  $N_N$  в таблице 6.5 – общее количество превышений  $k_{ij} > 0,5$ .

Таблица 6.5 – Параметры взаимной корреляции и среднеквадратичного отклонения энергии источников АЭ, связанных с литейными дефектами

Деталь	$N_{\Sigma}$	$k_{(ij)cp}$	$k_U$	$D_E$ , Дж	$N_k$	$N_N$	$D_E$ для $N_k$ , Дж
Боковые рамы							
95932	23	0,34	0,93	1473	18	41	1326
3113	27	0,43	0,91	358	27	74	358
18499	18	0,32	0,98	767	10	13	298
Надрессорные балки							
7441	16	0,32	0,93	641	7	4	575
10320	15	0,24	0,73	766	3	2	60
26663	20	0,30	0,96	633	15	12	311

Наиболее показательными параметрами из приведенных в таблице являются  $N_k$  и  $N_N$ , как характеризующие степень сродства физических процессов разрушения у источника АЭ. Поэтому представляет интерес изменение активности АЭ в ходе испытаний, при этом целесообразно представить изменение активности, приведенной к нагрузке. На рисунке 6.11 представлены результаты изменений активности исследованных источников АЭ.

Полученная динамика изменений активности источников АЭ четко разделила их на две категории, у первой группы (боковые рамы № 95932 и 3113, надрессорной балки № 26663) высокая активность АЭ наблюдается при нагрузках, превышающих рабочую, а остальные детали при высоких нагрузках имеют

низкую активность  $\frac{dA}{dF} \leq 1$ . Низкий показатель  $\frac{dA}{dF}$  у второй группы деталей при повышенных нагрузках говорит о не критическом характере развития источников АЭ, что может быть вызвано локальными изменениями, носящими конечный характер, такими, например, как отслаивание окалины на поверхности литейного дефекта, образование трещин-перемычек между объемными литейными неоднородностями типа пор.

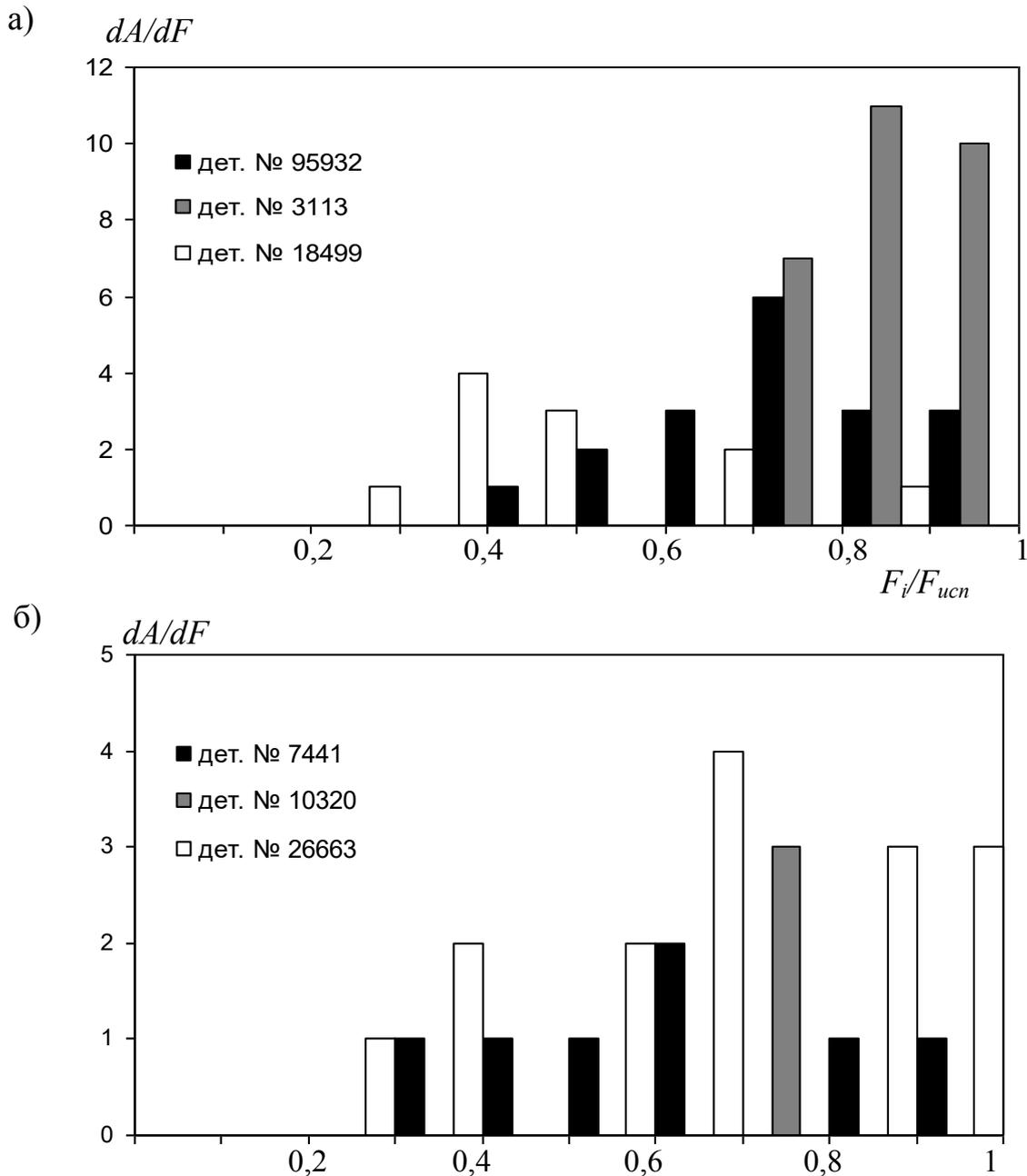


Рисунок 6.11 – Изменение активности сигналов АЭ с  $k_{ij} > 0,5$  в зависимости от относительной нагрузки в боковых рамах (а) и наддрессорных балках (б)

Другим значимым критерием поведения источников является динамика изменения энергии сигналов АЭ. В работе [265] приведены данные, свидетельствующие о том, что в процессе нагружения энергия сигналов АЭ на разных стадиях деформирования, формирования и развития очагов разрушения изменяется. На стадии нагружения низколегированной стали из деформируемой области наблюдаются одиночные акты АЭ в области напряжений, не превышающих предел усталости металла. При достижении предела выносливости и выше, при нагрузках до предела текучести наблюдается устойчивая АЭ, когда акты АЭ имеют достаточно небольшое отклонение от среднего значения энергии единичного акта и относительно небольшое значение. А на стадиях нагружения при превышении напряжения выше предела текучести энергия отдельных актов АЭ становится более неустойчивой относительно среднего значения и имеет большую дисперсию.

Результаты изменения энергии сигналов АЭ из области литейных дефектов показали, что все области излучения АЭ в окрестностях исследованных литейных дефектов не достигли нагрузок, превышающих предел текучести. Тем не менее детали с устойчивой АЭ при высоких нагрузках были забракованы.

Проведенные исследования показали, что испытания литых деталей с оценкой состояния литейных дефектов как потенциальных источников АЭ принципиально позволяют определить состояние этих участков. Для достижения этой цели использовали анализ изменения таких характеристик, как энергия АЭ, активность, коэффициент взаимной корреляции сигналов, позволяющие не только идентифицировать источник, но и качественно оценить его напряженно-деформированное состояние. На основании полученных результатов разработана методика оценки состояния литейных дефектов, учитывающая нагрузку максимума активности источников АЭ и таким образом определяющая интенсивность развития усталостного дефекта на литейном дефекте.

Полученные в ходе АЭ контроля данные позволили обнаружить источники АЭ, классифицированные как развивающиеся активные источники, что принципиально согласуется с данными работы [206], когда было установлено, что не более 17 % литейных дефектов могут излучать АЭ, которую можно отнести к раз-

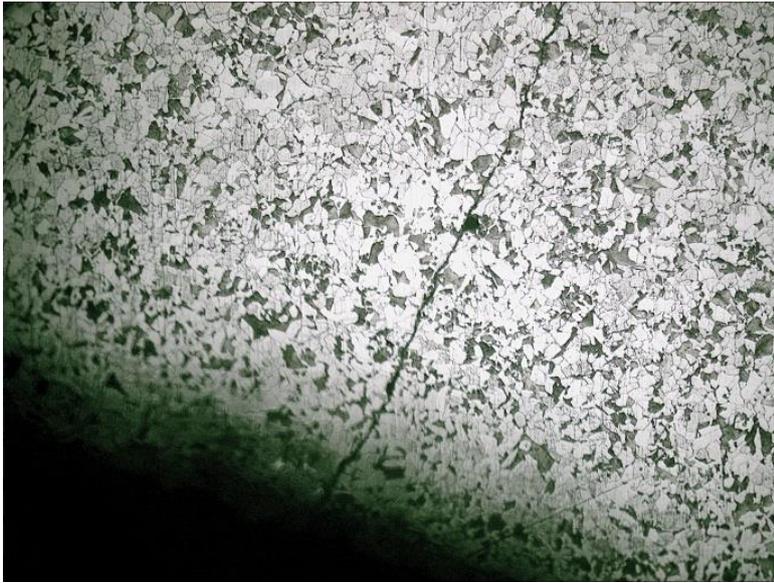


Рисунок 6.12 – Выявленная при АЭ трещина на литейном дефекте,  $\times 15$

литейных дефектах, что было подтверждено металлографическими исследованиями (рисунок 6.12).

вивающимся при механических испытаниях источникам. Таким образом, большинство литых боковых рам коробчатого сечения имеют литейные дефекты, которые не развиваются и не представляют опасности. В то же время анализ результатов контроля по корреляционным коэффициентам  $k(ij)_{cp}$  и  $kU$  позволил выявить развивающиеся трещины на некоторых ли-

#### **6.4. Исследование поведения параметров сигналов акустической эмиссии, излучаемой из участков, отремонтированных сваркой и наплавкой**

На первом этапе исследовали АЭ, излучаемую из области деталей, восстановленных наплавкой. Для экспериментальных исследований случайным образом были отобраны боковые рамы из партии наплавленных деталей. Основные результаты исследований в этом направлении описаны в работе [266].

После проведения АЭ диагностики наплавленных участков их исследовали другими методами НК (ультразвуковой – УЗК, ФЗК, МПК, вихретоковый – ВТК) и провели металлографические исследования (МИ), обобщенные результаты которых представлены в таблице 6.6.

АЭ диагностику наплавленных слоев проводили с применением системы СЦАД 16.03 по стандартной методике [8] при нагружении детали последовательно двумя видами нагрузки: горизонтальной – с силой 147 кН и вертикальной – с силой 550 кН со схемой установки приемников, приведенной на рисунке 6.2, а.

Вихретоковый (дефектоскоп ВД-113), ФЗ (дефектоскоп ДФ 201.1 и МП контроль (намагничивающее устройство УНМ 200/3000 и суспензия на основе концентрата магнитной суспензии ДИАГМА1200) наплавленных участков и участков, прилегающих к ним, проводили в соответствии с действующей нормативной документацией [267–270].

Ультразвуковой контроль (дефектоскоп УД2-102) проводили эхо-методом после специальной подготовки поверхности до шероховатости не хуже  $R_z = 40$  мкм. Ручное продольно-поперечное сканирование осуществляли по всей направленной поверхности в четырех направлениях с шагом 2...3 мм стандартным преобразователем с углом ввода  $50^\circ$ . Для работы использовали условную чувствительность ультразвукового контроля  $N_{усл} = 24$  дБ.

Таблица 6.6 – Боковые рамы, предоставленные для проведения комплексного исследования

№ боковой рамы	Марка стали	Виды диагностики, контроля или исследований					
		АЭД	УЗК	ФЗК	ВТК	МПК	МИ
Детали, восстановленные наплавлением							
28343	20Л	Брак	Брак	Доп	–	–	Брак
72588	20ГЛ	–	–	–	–	–	–
43230	20ГТЛ	Брак	Брак	Доп	–	–	Брак
11658	20Г1ФЛ	Брак	–	–	–	–	Брак
61095	20ГЛ	–	–	–	–	–	–
69833	20ГЛ	–	–	–	–	–	–

Металлографические исследования проводили на вырезанных образцах, представляющих собой типичный срез наплавленного слоя и участков, на кото-

рых была высокая активность АЭ. Металлографический анализ выполняли на металлографическом микроскопе NU 2E после травления 3%-м раствором азотной кислоты в спирте при увеличении 250. Макроскопический анализ выполнялся после травления 50%-м раствором соляной кислоты в воде.

В ходе испытаний регистрировали все сигналы АЭ, превышающие порог дискриминации, равный 3 дБ от амплитудного уровня шумов каналов. Затем их подвергали фильтрации по амплитудному критерию (на уровне 15 дБ от порога дискриминации), времени нарастания сигнала (не более 300 мкс). Полученные обобщенные результаты АЭ контроля: суммарный счет сигналов в зоне наплавки –  $N_{\Sigma}$  и коэффициенты  $k_{ij}$ ,  $k_U$ ,  $k_{sc}$  для всех объектов сведены в таблицу 6.7.

После фильтрации записанных сигналов, в режиме геометрической локации источников было установлено, что в трех деталях (№ 11658, 28343, 43230) существуют активные источники АЭ, детали забракованы в автоматическом режиме (пример результатов локации источников представлен на рисунке 6.13).

По энергии АЭ источников их можно уверенно разделить на три категории:

- случайные, имеющие  $N_i$ , не превышающее 2;
- малоактивные,  $2 < N_i < 10$ ;
- активные,  $9 < N_i < 20$ ;
- критические,  $19 < N_i$ .

Время регистрации сигналов АЭ от каждого источника распределено случайным образом как во время плавного нагружения, так и во время выдержки при максимальной нагрузке. Амплитудное распределение сигналов АЭ не отличалось от результатов испытаний деталей с другими типами активных и критически активных дефектов.

Основной особенностью АЭ наплавленного слоя даже при высокой их активности является малая энергия дискретных сигналов и отсутствие взаимной корреляции сигналов в отличие от эксплуатационных развивающихся дефектов.

Таблица 6.7 – Результаты контроля наплавленных слоев ОК

№ детали	Вид нагрузки	Первая опорная поверхность				Вторая опорная Поверхность				Результат
		$N_{\Sigma}$	$k_{ij}$	$k_{U,}$	$k_{sc}$	$N_{\Sigma}$	$k_{ij}$	$k_{U,}$	$k_{sc}$	
<i>Детали, восстановленные наплавкой</i>										
11658	Гор	–	–	–	–	2	0,21	–	0,33	Брак
	верт	17	0,23	0,13	0,31	227	0,24	0,01	0,73	
28343	Гор	–	–	–	–	23	0,22	0,01	0,45	Брак
	верт	120	0,18	0,02	0,54	148	0,17	0,01	0,6	
43230	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Брак
	верт	2	0,21	–	1	122	0,19	0,02	0,41	
61095	Гор	–	–	–	–	2	0,12	–	0,25	Годная
	верт	6	0,16	0,01	0,17	20	0,28	0,07	0,42	
69833	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Годная
	верт	11	0,19	0,16	0,31	8	0,26	0,22	0,16	
72588	Гор	2	0,21	–	0,09	–	–	–	–	Годная
	верт	8	0,2	0,18	0,13	3	0,15	–	0,27	
<i>Детали, не подвергавшиеся восстановлению</i>										
13521	Гор	2	0,26	–	0,25	–	–	–	–	Годная
	верт	8	0,22	0,14	0,23	3	0,18	–	0,09	
65303	Гор	8	0,17	0,23	0,18	–	–	–	–	Брак
	верт	10	0,21	0,11	0,45	5	0,2	0,1	0,25	
12494	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Годная
	верт	3	0,13	–	0,23	5	0,16	0,12	0,12	
20446	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Брак
	верт	2	0,11	–	0,13	56	0,18	0,07	0,49	
352479	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Брак
	верт	5	0,16	0,22	0,31	14	0,14	0,09	0,31	
85245	Гор	–	–	–	–	–	–	–	–	Годная
	верт	2	0,17	–	0,13	–	–	–	–	

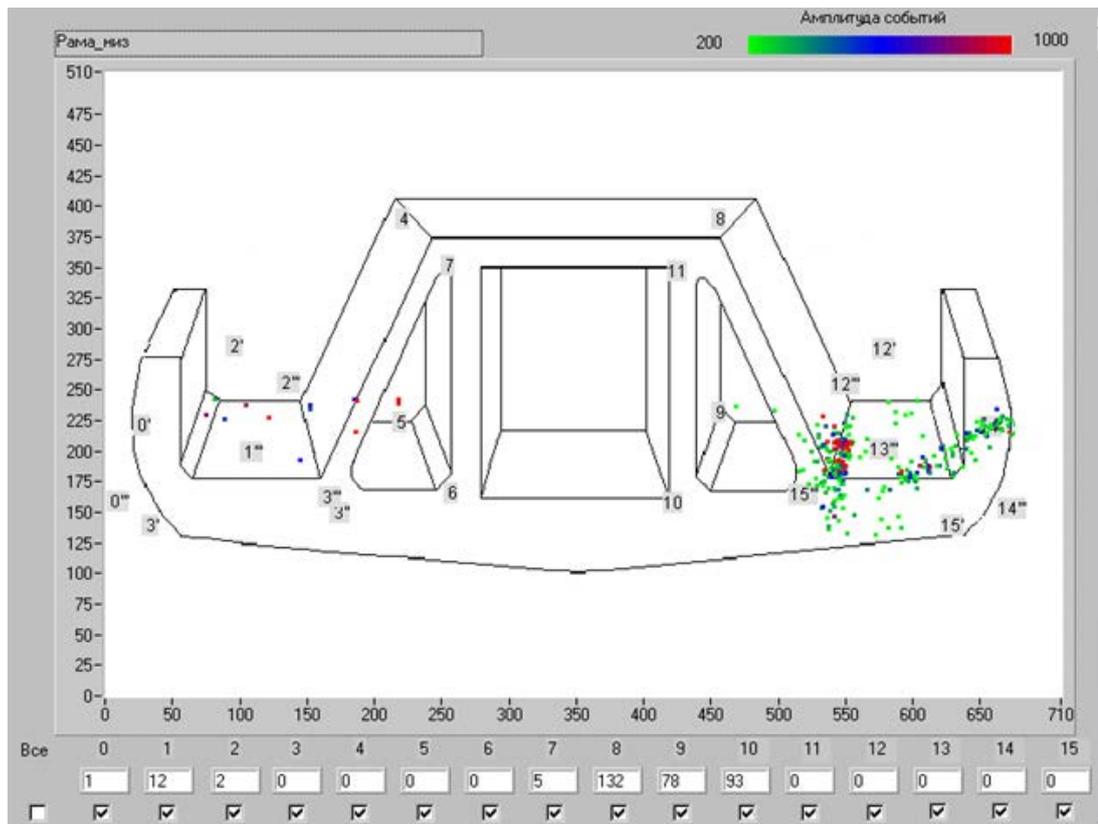


Рисунок 6.13 – Отображение результатов локации источников АЭ при вертикальном нагружении боковой рамы № 43230

С технологической точки зрения установлено, что для наиболее эффективного контроля следует использовать амплитудный порог фильтрации источников АЭ (на 9 дБ) относительно порога дискриминации. Определение количества источников и  $E_{\Sigma}$  проводят на обоих пороговых уровнях. При обнаружении источников на низшем уровне требуется внимание к источникам, оценка сигналов по дополнительным критериям или дополнительный контроль другими методами и средствами НК. Фиксация источников при более высоком пороговом уровне свидетельствует о наличии опасных источников, которые недопустимы.

При экспертной оценке результатов проведенного АЭ контроля (специалистами 2-го и 3-го уровней) из шести боковых рам было забраковано три. Все боковые рамы были забракованы по высокой активности акустической эмиссии в буксовом проеме в зоне наплавленных опорных поверхностей. Остальные боковые рамы имели низкую активность акустической эмиссии и признаны были годными.

В целом при сравнении с деталями без восстановления отмечается более высокий уровень суммарного счета и количества источников АЭ. Появившиеся в ходе наплавления дефекты и дефектные структуры излучают АЭ более интенсивно, что выражается в количестве сигналов от источников, суммарной энергии АЭ источников.

Вихретоковый и магнитопорошковый методы не позволили обнаружить поверхностных и подповерхностных дефектов на наплавленных поверхностях и в прилегающих к ним зонах.

По результатам ФЗ контроля поверхностных трещин в зоне наплавленного слоя не обнаружено, однако выявлены области с повышенным градиентом магнитного поля над опорной поверхностью боковых рам № 28343 и 43230 (дальнейший металлографический анализ подтвердил наличие внутренних дефектов – рисунок 6.14). Следует отметить, что повышение градиента не превышало порог срабатывания дефектоскопа, настроенного на поиск дефектов литых деталей по требованиям руководящего документа [268].

а)



б)

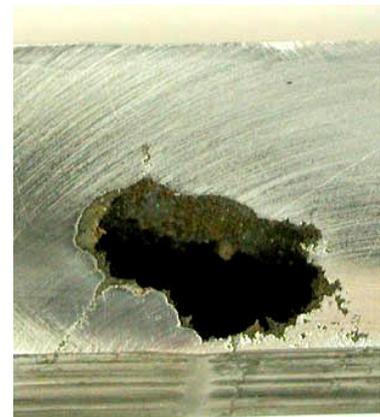


Рисунок 6.14 – Литейные дефекты в подповерхностном слое, обнаруженные при АЭ и ФЗ контроле в зоне наплавленного слоя боковых рам № 28343 (а) и 43230 (б),  $\times 2$

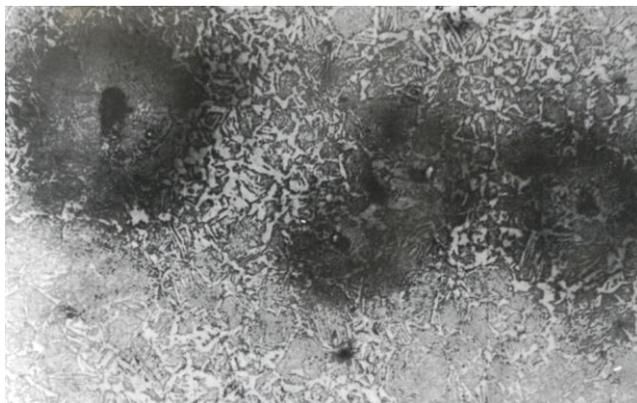
Ультразвуковым методом уверенно подтверждены внутренние несплошности в граничных с наплавленным слоях основного металла. Дефекты были клас-

сифицированы как компактные, объемные компактные и объемные протяженные, т.е. идентифицировать трещины, находящиеся на объемных дефектах, не удалось. Часть обнаруженных дефектов была подтверждена при металлографическом исследовании (рисунок 6.14), размеры обнаруженных раковин составили от 5 до 20 мм по максимальному линейному размеру.

Общие металлографические исследования показали, что наиболее часто встречаемым технологическим литейным пороком боковых рам являются раковины под опорной поверхностью, в ее переходах от коробчатой конфигурации к тавровой и в угловых участках, имеющие иногда на поверхности трещиновидные литейные несплошности, неопасные для эксплуатации. При восстановлении наплавкой опорных поверхностей боковой рамы с литейными несплошностями, залегающими на малой глубине, в результате температурного воздействия могут образоваться как поверхностные трещины, так и внутренние, развивающиеся от литейных дефектов (см. рисунок 6.14).

Металлографический анализ показал, что дефектные, по признакам АЭ метода, наплавленные поверхности имеют внутренние трещины, развивающиеся от различных источников, таких как внутренние поры наплавленного слоя, границы наплавленного слоя с основным металлом (рисунок 6.15). При этом все активные источники при металлографическом исследовании полностью идентифицированы.

*a)*



*б)*

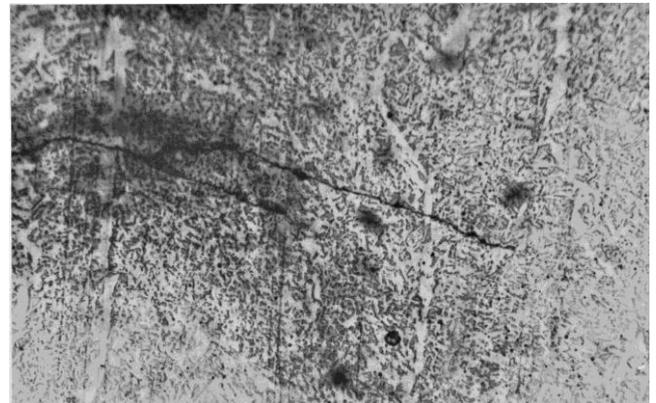


Рисунок 6.15 – Поры с трещинами в зоне наплавленного слоя (*a*) и трещины в наплавленном слое (*б*) боковой рамы № 28343,  $\times 250$

Микроскопические исследования наплавленного металла исследованных боковых рам показали, что структура металла характерна для многослойной наплавки при применении низколегированного наплавочного материала. Структура наплавленных слоев двухфазная, напоминающая структуру зернистого перлита, с регулярными выделениями второй фазы в виде столбцов. В исследованных шлифах наплавленных слоев имеются микропоры размерами 5...15 мкм (см. рисунок 6.15, а).

Микроструктура переходной зоны состоит из двух прослоек – тонкой, которая имеет грубый видманштеттов феррит с перлитом пластинчатого типа, и толстой, имеющей однородную феррито-перлитную структуру с мелкими зернами феррита и колониями пластинчатого перлита. Переходные зоны содержат видимые при микроскопическом обследовании дефекты, аналогичные всему наплавленному слою (см. рисунок 6.15).

Общие выводы проведенных исследований показали, что АЭ диагностика является эффективным средством контроля качества наплавляемого слоя с применением специализированного диагностического алгоритма.

Разработана методика и определены критерии АЭ диагностики деталей с целью определения дефектов перед восстановлением и после него, которая включает двухуровневую систему фильтрации источников по амплитудному и временному критериям.

Выходной акустико-эмиссионный контроль после наплавки обеспечивает выявление таких дефектов наплавки, как, например, термические трещины, в том числе развивающиеся от пор и неметаллических включений в наплавленном слое, и трещин, возникших при нарушениях режима наплавки. Метод позволяет выявлять трещины любой ориентации в наплавленном слое.

Длина выявленных трещин различного происхождения (по результатам металлографического исследования) варьируются от 150 мкм до нескольких мм.

На втором этапе данных исследований анализировали АЭ, полученную из области участков, отремонтированных сваркой. Детали для исследований были отобраны по наличию сварки. При диагностировании 107 боковых рам и надрес-

сорных балок с дефектами сварки методом АЭ зарегистрирован 21 активный источник из области сварки, расположенный на поверхности технологических окон боковых рам, наклонных плоскостей и опорных поверхностей подпятника наддрессорных балок. На рисунке 6.16 приведен пример области локации источников на наддрессорной балке с наплавленными наклонными плоскостями.

Магнитным методом не удалось осуществлять контроль из-за высокой шероховатости данных участков и наличия магнитной неоднородности на границах основного и наплавленного металлов. Для всех деталей в области локализованных источников на участках сварки провели шлифовку, а при необходимости и травление 4-процентным раствором азотной кислоты. При осмотре с лупой обнаружены трещины в зоне сварки у девяти деталей. У остальных деталей поверхностных и подповерхностных дефектов не обнаружили.

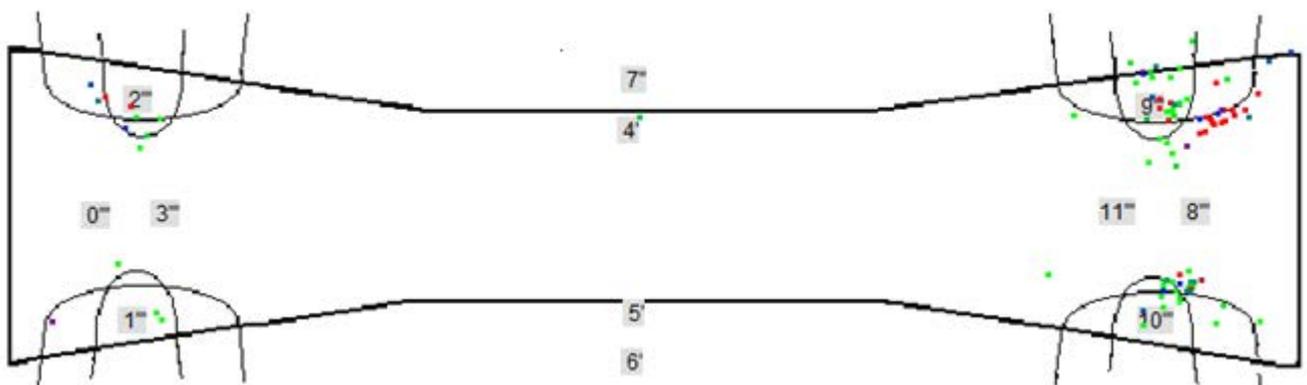


Рисунок 6.16 – Локализованные сигналы из наклонных плоскостей, отремонтированных наплавкой

Подводя итоги исследований литых деталей с участками, отремонтированными сваркой и наплавкой, следует отметить, что для таких участков характерны низкие значения коэффициента взаимной корреляции между сигналами, так как структурные изменения происходят в достаточно большом объеме деформируемого металла и релаксация термических напряжений происходит в разных локальных участках. Высокие значения коэффициента взаимной корреляции наблюдаются лишь для отдельных пар сигналов.

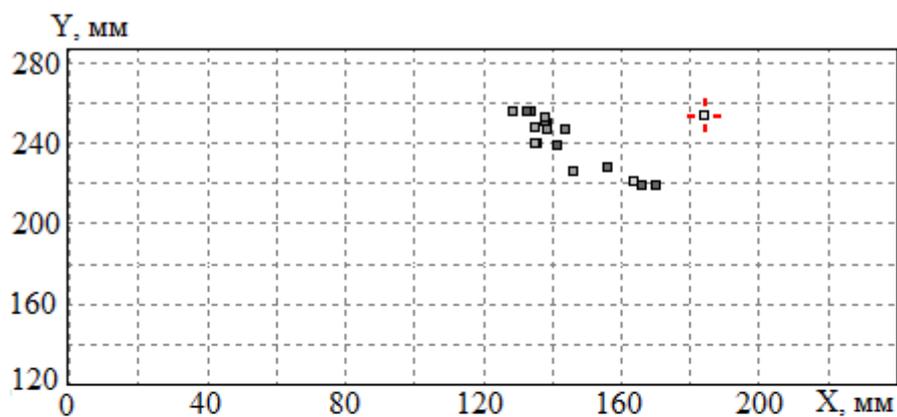
Также для контроля участков со сваркой и наплавкой характерно пониженное среднее значение коэффициента нагрузки в сравнении с другими дефектами – активными источниками АЭ.

Как показали результаты АЭ контроля участков со сварными работами [271] их можно разделить на три типа:

- компактные, к которым относятся развивающиеся трещины на дефектах сварки;
- рассеянные в виде дефектной структуры всего участка сварных работ;
- компактные на фоне рассеянных.

На рисунке. 6.17 приведены примеры компактного источника – трещины и рассеянного, который был вызван релаксацией напряжений участка наплавки. Для сравнения были выбраны одни и те же участки надressорной балки.

а)



б)

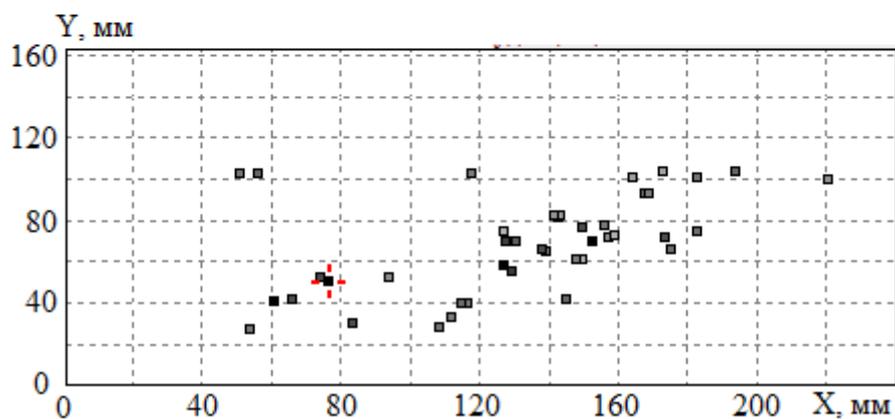


Рисунок 6.17 – Координаты сигналов от компактного источника - трещины в детали № 2267 (а) и источника – растрескивания наплавленного участка в детали № 4980 (б) в наклонной плоскости надressорной балки

Если для концентрированных источников типа трещин важное значение имеет суммарная энергия испытаний, особенно это касается кластеров сигналов с высокой корреляцией [228]. Суммарная энергия кластера напрямую связана с величиной трещины [272].

Для распределенных источников более важной характеристикой является концентрация энергии, определяемая по формуле:

$$C_E = \frac{E_{\Sigma i}}{S_i}, \quad (6.6)$$

где  $E_{\Sigma i}$  – суммарная энергия  $i$ -того источника;  $S_i$  – площадь  $i$ -того источника. Именно концентрация распределенного источника характеризует его активность и величину напряжений, которые достигаются при максимальной нагрузке испытаний.

На рисунке 6.18 представлена зависимость накопленной концентрации энергии сигналов АЭ в ходе испытания в области упругой деформации образцов из низкоуглеродистой стали.

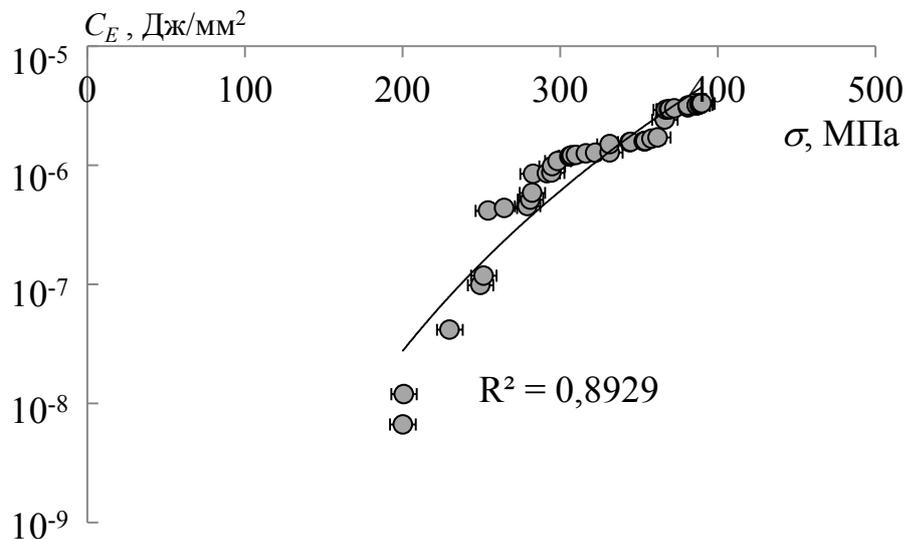


Рисунок 6.18 – Связь концентрации энергии в области упругой деформации с напряжением при растяжении образца из низкоуглеродистой стали

Характерной особенностью связи концентрации распределенного источника с напряженным состоянием в упругой области деформации является устойчивость множителя  $A$  степенной зависимости и большой разброс показателя степени  $b$  степенной зависимости:

$$\sigma = A \cdot C_E^b,$$

что согласуется с моделью В.В. Носова для устойчивых областей состояния материалов [219, 220].

При обработке данных от различных источников было установлено, что развивающиеся трещины на разных стадиях имеют высокую корреляционную связь сигналов от одного акта АЭ, принятых разными преобразователями (см. рисунок 6.19, а). Такие дефекты не всегда являются компактными, но их можно идентифицировать с помощью корреляционного анализа.

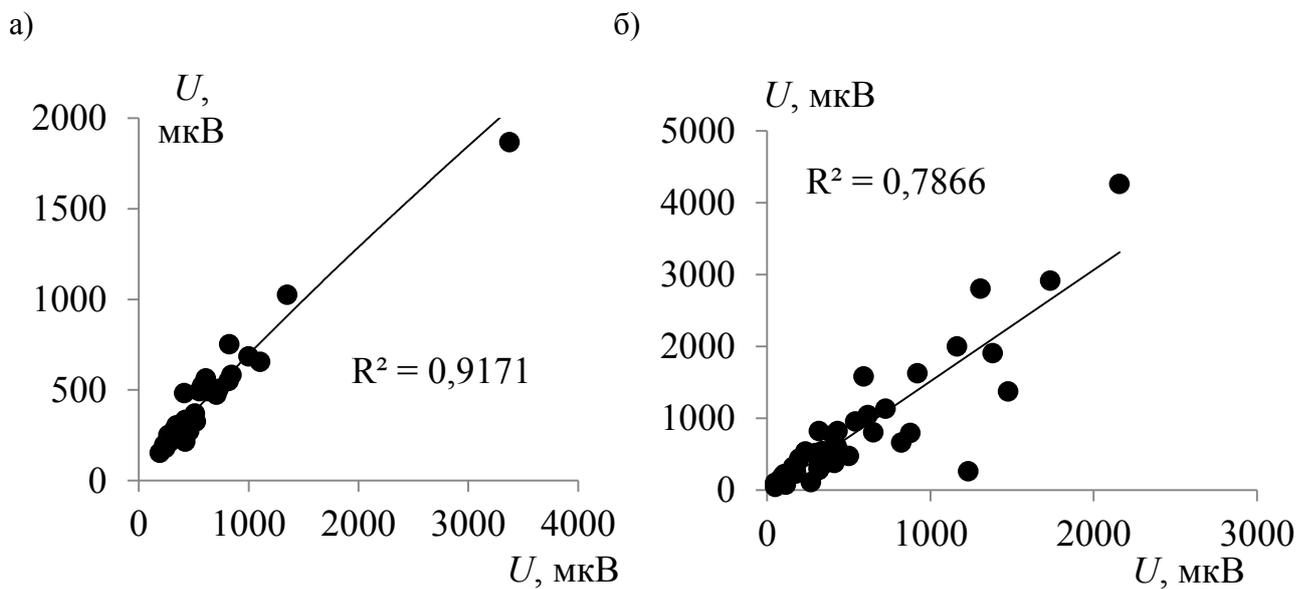


Рисунок 6.19 – Корреляционное поле данных между амплитудами сигналов, зарегистрированных двумя преобразователями от развивающейся трещины (а) и локальной области пластической деформации (б)

При сравнении сигналов от таких источников в разные периоды времени определили, что развивающиеся стабильно трещины имеют высокий коэффициент корреляции между сигналами, полученными в разные моменты времени (свыше 0,5). При приближении к стадии ускоренного роста трещины коэффициент взаимной корреляции между сигналами снижается, в то время как оптимальная связь максимальных амплитуд сигналов одного акта для разных приемников соблюдается. На стадии предшествующей разрушению резко увеличивается амплитуда и энергия сигналов АЭ от трещины.

Области пластической деформации с точки зрения концентрации являются более размытыми в силу возрастающей погрешности при определении времени прихода сигналов на приемники [8]. Кроме того такие области имеют более низкую корреляционную связь по амплитуде для разных актов АЭ, зарегистрированных разными преобразователями (см. рисунок 6.19, б) по сравнению с развивающимися трещинами.

В то же время дефектная структура имеет еще более выраженный разброс координат для отдельных актов АЭ, которые распределены по области такой структуры в зависимости от напряжений в ней. Что характерно, релаксация внутренних напряжений, возникших в процессе остывания сварного шва, имеет низкие значения амплитуд сигналов АЭ с низкой корреляцией амплитуд сигналов, принятых разными приемными преобразователями (рисунок 6.20).

Полученные результаты были использованы для идентификации дефектов на участках отремонтированных заваркой литейных дефектов боковых рам и участков надрессорных балок, восстановленных наплавкой.

На детали источники АЭ определяли как распределенные и компактные по площади, которую занимают вычисленные точки местонахождения каждого сигнала при аналитическом решении задачи определения координат. Однако такой подход применим с относительно высокой надежностью только для источников с достаточно большим числом сигналов АЭ.

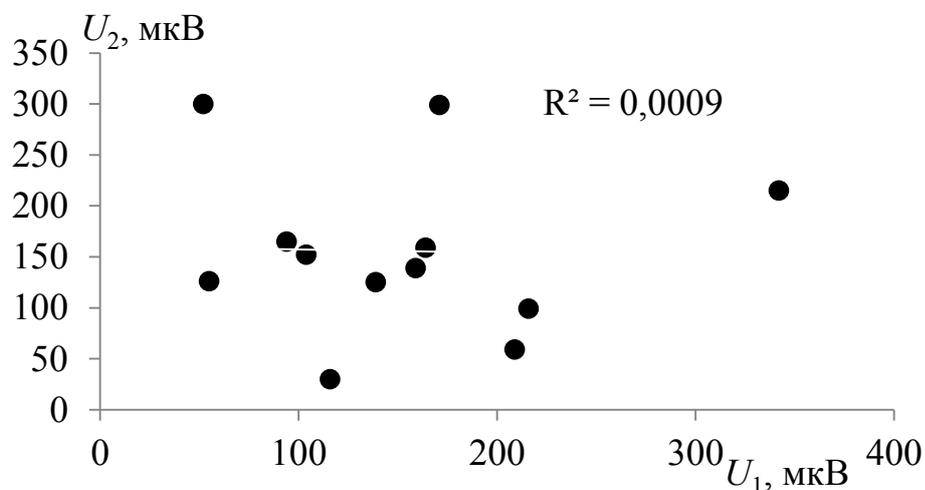


Рисунок 6.20 – Амплитуды сигналов с участка с остаточными структурными напряжениями

Проведенные испытания боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов с использованием корреляционного анализа показали, что оценка состояния участков отремонтированных заваркой и наплавкой допустимых для ремонта участков позволяет выделить трещины, области пластической деформации, дефектные разрушающиеся структуры типа видманштетта, участки содержащие микротрещины.

Другой сложностью надежного оценивания распределенных источников является невозможность определить точные размеры дефектных структур, так как только металлографический анализ позволяет говорить о глубине такого рода опасного источника.

Экспериментальные исследования изменений параметров АЭ при деформировании образцов из низколегированных литых сталей позволили определить критерии оценки и локальных источников и распределенных типа дефектных структур наплавленного слоя или ремонта сваркой. Результаты исследований приведены в работе [273].

Значимыми параметрами распределенных источников являются концентрация энергии такого источника в единице объема материала объекта контроля, при этом для разделения типов источников можно использовать коэффициент затухания сигналов или коэффициент корреляции между максимальными амплитудами сигнала принятыми разными приемниками.

Для локальных концентраторов значимыми параметрами является суммарная энергия сигналов АЭ от источника, коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника, показатель степенного роста накапливаемой суммарной энергии сигналов АЭ в ходе испытания.

Таким образом, для разных развивающихся источников можно обобщить поведение трех введенных коэффициентов  $k_{ij}$ ,  $k_U$  и  $k_{sc}$ . Эти результаты приведены в таблице 6.8. А на основе приведенных в таблице значений коэффициентов  $k_{ij}$ ,  $k_U$  и  $k_{sc}$  можно построить алгоритм идентификации каждого из приведенных типов

источников. А уже по энергетическим параметрам определенного источника судить о его степени развитости.

Таблица 6.8 – Критерии распознавания источника

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 (упрочнение перед разрушением)	<0,3	0,5-0,9	$\geq 0,3$
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

Блок схема алгоритма распознавания типа источника АЭ приведена на рисунке 6.21. Использование предлагаемого алгоритма позволяет выявить все приведенные в таблице 6.8 за исключением разделения упругой и пластической деформации на ранней ее стадии. Однако пластическую деформацию можно определить измерительным способом, учитывая что на вагоноремонтных и вагоностроительных предприятиях имеется широкий спектр шаблонов и измерительных средств, позволяющих идентифицировать пластически деформированные участки литых деталей.

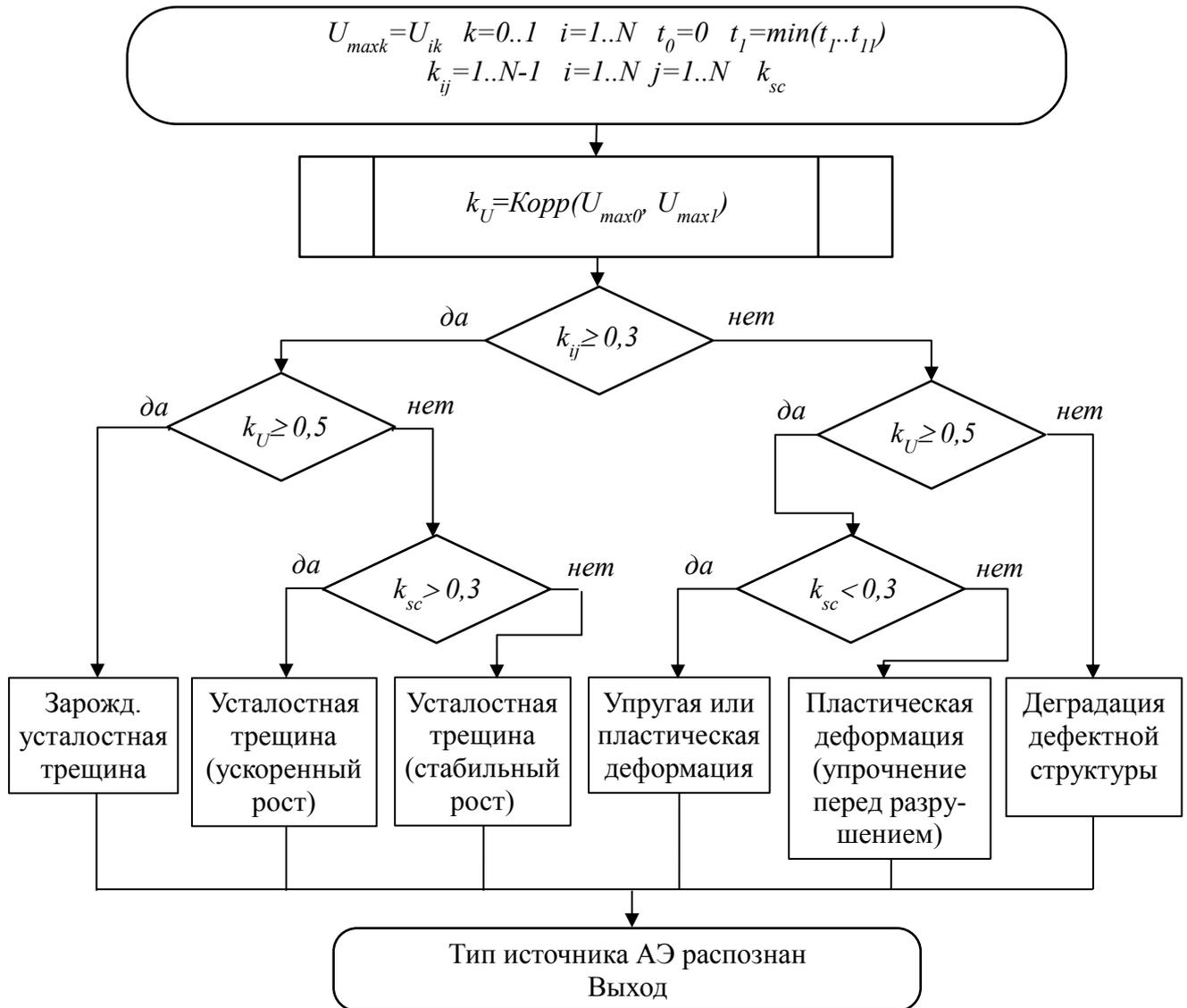


Рисунок 6.21 – Блок-схема алгоритма распознавании типов источников АЭ в литых деталях

### 6.5. Экспериментальные исследования поведения параметров акустической эмиссии при повторных испытаниях литых деталей

Иногда при диагностике литых деталей тележки грузового вагона невозможно установить, каковы были рабочие нагрузки (если при ее эксплуатации развивались дефекты типа ползунов и выщербин поверхности катания колес), изме-

няющие напряженное состояние различных участков. Если напряженное состояние на некоторых участках литой детали не превышает значений, полученных в процессе ее эксплуатации, то это может вызвать искажение АЭ информации из-за действия эффекта Кайзера. Кроме того, в ряде методик АЭ контроля предусматриваются повторные нагружения [270]. Однако обоснованность их числа для различных литых объектов слабо отражена в научной и методической литературе.

Поэтому было проведено экспериментальное исследование изменения параметров сигналов АЭ при повторных испытаниях литых деталей тележки грузового вагона, изложенное в работе [274].

Отличительной особенностью литых деталей является неравномерность толщины их стенки, наличие внутренних и поверхностных несплошностей (пор, раковин, пористостей) и структурных неоднородностей. Эти обстоятельства могут существенно влиять на результат АЭ контроля. Как показывают проведенные исследования, при НК боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов регистрируется много ложных источников сигналов АЭ, затрудняющих контроль [275]. Поэтому диагностика литых деталей с реализацией нескольких циклов нагружения с последующим анализом изменений параметров сигналов АЭ представляет практический интерес.

Для повышения чувствительности каналов и достоверности идентификации источников сигналов АЭ при обработке информации их амплитудный порог уменьшали на 9 дБ. Экспериментально установлено, что это позволило повысить почти в три раза чувствительность измерительного канала и увеличить число регистрируемых случайных сигналов не более чем на 10 %.

Каждую деталь нагружали до 20 раз нагрузками, предусмотренными методикой диагностирования. При этом нагрузку подавали плавно в течение 20 с, после чего ее выдерживали при максимальном значении в течение такого же интервала времени.

В таблице 6.9 приведены максимальные напряжения  $\sigma_u$ , полученные при статической нагрузке, и суммарное число сигналов АЭ от источника во время первого нагружения  $N_{\Sigma 1}$  и за последующие 20 циклов нагружения  $N_{\Sigma 20}$ . Макси-

мальное напряжение  $\sigma_u$  участка детали с дефектом определяли расчетным путем, на основании данных, полученных при измерении растягивающих напряжений на участках без дефектов. Затем магнитным методом измеряли размеры дефекта с погрешностью не более 10 %, после чего напряжения  $\sigma_u$  определяли с учетом уменьшенной площади сечения из-за наличия дефекта.

Таблица 6.9 – Данные о дефектах, напряженном состоянии и суммарном числе сигналов АЭ, полученных при контроле боковых рам и надрессорных балок

Номер детали	Характер и параметры дефекта	$\sigma_u$ , МПа	$N_{\Sigma 1}$	$N_{\Sigma 20}$
Боковые рамы				
1531	Литейная утяжина во внутренней поверхности технологического окна длиной 30 мм и максимальной глубиной до 6 мм	100	1	8
40186	Трещина в нижнем углу рессорного проема	285	37	92
2596	Трещина на опорной поверхности буксового проема длиной 50 мм	185	10	44
84637	Трещиновидный литейный дефект во внутреннем углу буксового проема	150	2	20
Надрессорные балки				
342	Поперечная трещина в наклонной плоскости длиной 110 мм с выходом на верхний пояс длиной 75 мм	210	15	133
8931	Продольная трещина в наклонной плоскости длиной 90 мм	140	14	173
21955	Трещина подпятника протяженностью 120 мм	140	43	80
50851	Трещиновидный дефект наклонной плоскости протяженностью 45 мм	160	7	27

Первичное нагружение показало, что литейные дефекты, на которых не обнаружены следы роста усталостных трещин, являются источниками сигналов АЭ со слабой активностью. К таким источникам отнесены дефекты в боковых рамах № 1531 и 84637 и надрессорной балке № 50851, которые и при повторных нагружениях неактивно излучали сигналы АЭ.

Источники с низкой активностью в деталях излучали лишь единичные сигналы АЭ за цикл. Сигналы регистрировали не при каждом цикле нагружений. Например, дефект в боковой раме № 1531 излучил не более двух сигналов за цикл и лишь в пяти циклах. При этом отмечается, что чем активнее был источник при первом нагружении для этих деталей, тем активнее он вел себя при последующих циклах нагружения.

Повышение суммарного счета сигналов  $N_{\Sigma}$  и энергии  $E_{\Sigma}$  первого цикла нагружения сопровождалось увеличением активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  источника при последующих циклах нагружения. Динамика изменения этих параметров от цикла к циклу для источника в надрессорной балке № 50851 приведена на рисунке 6.22, а.

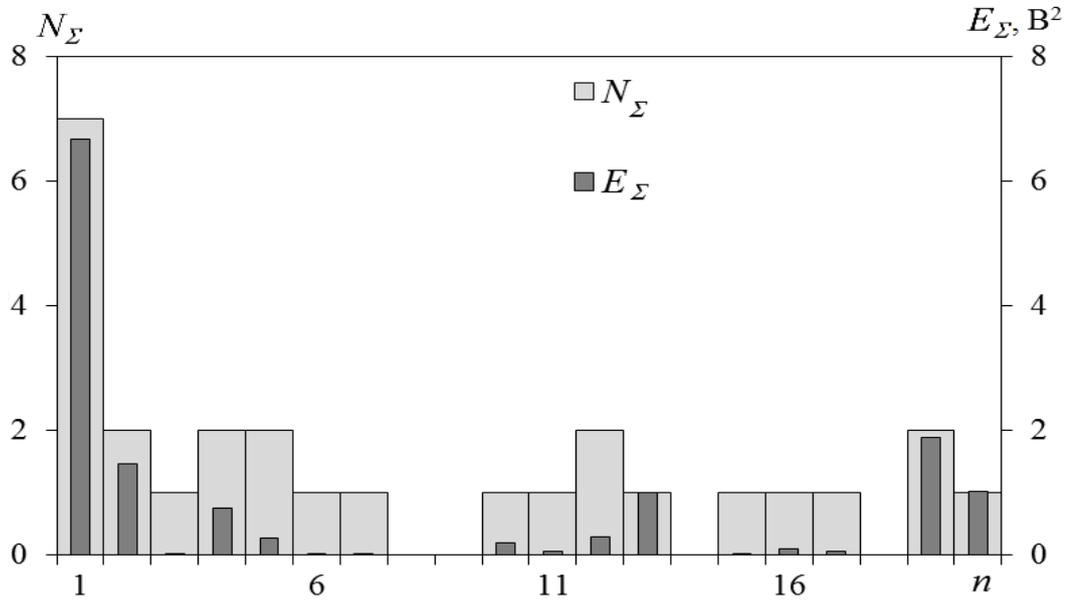
Как видно из результатов испытаний, при повторных циклах нагружения источники с достаточно слабой активностью содержат сигналы АЭ. Это означает, что серия повторных испытаний методом АЭ позволяет накапливать информацию об источнике и с большей достоверностью идентифицировать его на фоне случайных акустических помех.

Детали с активными источниками обладают различной тенденцией изменения параметров сигналов АЭ от цикла к циклу. Например, продольная усталостная трещина в надрессорной балке № 8931 была активным источником в каждом цикле нагружения (рисунок 6.22, б). Это может быть связано с типом источника, его пространственным положением, степенью развития и другими его параметрами и требует дополнительного исследования.

Проведенные исследования показали, что детали условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся детали с развитыми усталостными трещинами (например, надрессорные балки № 342 и 21955) либо расположенными так, что при нагружении трещины осуществляется трение ее берегов (напри-

мер, продольная трещина, расположенная перпендикулярно направлению изгиба при нагружении надрессорной балки № 8931).

a)



b)

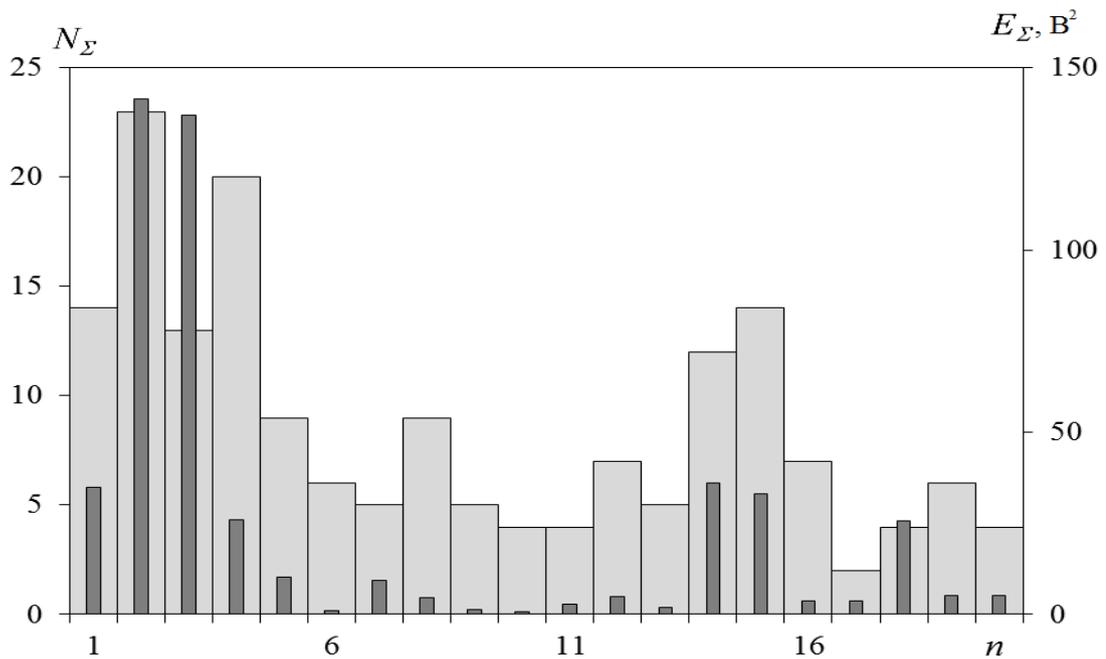
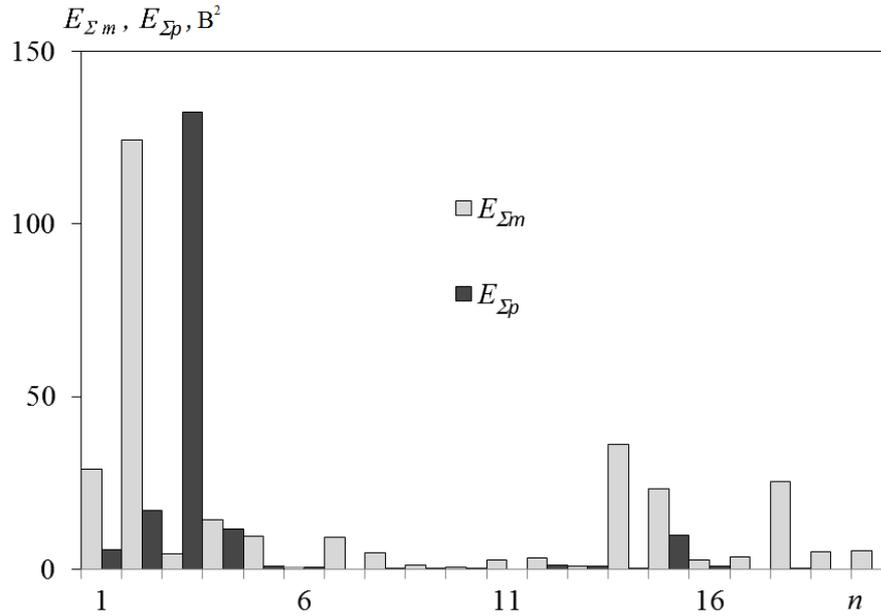


Рисунок 6.22 – Изменение суммарного числа  $N_{\Sigma}$  и суммарной энергии  $E_{\Sigma}$  от числа циклов нагружения при испытании надрессорных балок № 50851 (a) и № 8931 (б)

Детали с такими источниками АЭ характеризуются относительно большим числом  $N_{\Sigma m}$  сигналов АЭ, суммарной энергией  $E_{\Sigma m}$  зарегистрированных сигналов и суммарной энергией  $N_{\Sigma p}$  на этапе увеличения нагрузки. Эти энергетические па-

раметры обладают большими значениями колебательной энергии, связанными с трением берегов усталостных трещин (рисунок 6.23, *a*).

*a)*



*б)*

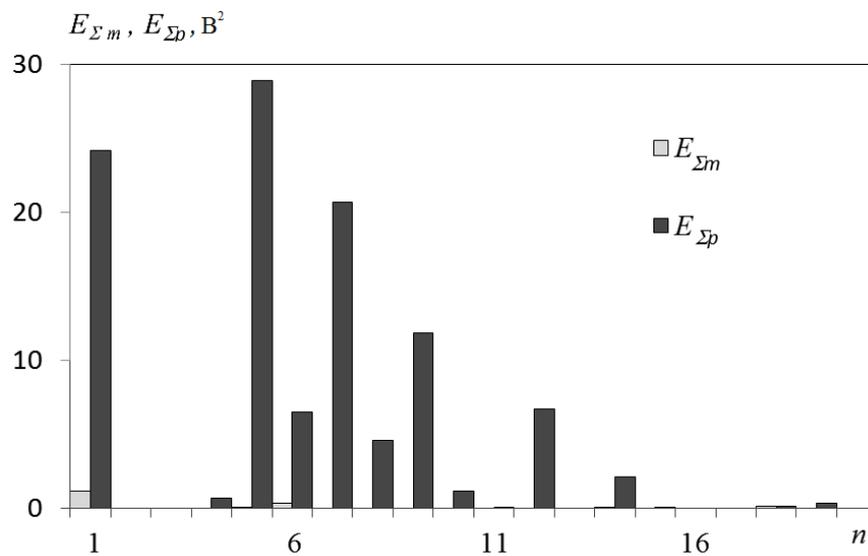


Рисунок 6.23 – Распределение суммарной энергии на этапе увеличения нагрузки  $E_{\Sigma m}$  и на этапе приближения к максимальной нагрузке  $E_{\Sigma p}$ , полученных при трении берегов поперечной усталостной трещины (*a*) и при приращении длины усталостной трещины (*б*) в боковой раме № 40186

Вторая группа деталей (рисунок 6.23, *б*) обладала значительно меньшим числом сигналов АЭ  $N_{\Sigma m}$  на этапе увеличения нагрузки и большим числом сигналов  $N_{\Sigma p}$  на стадиях приближения к максимальной нагрузке (свыше  $0,9P_{исп}$ , где

$P_{исп}$  – испытательная нагрузка) и ее выдержки. Для этих деталей преобладают сигналы АЭ, вызванные актами приращения длины усталостных трещин (см. рисунок 6.23, б). Анализ суммарного числа сигналов АЭ второй группы  $N_{\Sigma p}$  позволяет оценить стадию развития дефекта и соотнести ее с напряженным состоянием в вершине трещины, аналогично способу, представленному в работе [221].

Для деталей, у которых сигналы АЭ в основном излучаются при больших значениях нагрузки, характерной особенностью является относительно быстрое убывание их числа и энергии на повторных циклах при нагрузках, составляющих менее 90 % от максимальной. В то же время для таких деталей при приближении к максимальной нагрузке и на этапе ее выдержки отмечается более высокая активность источника сигналов АЭ при повторных нагружениях. Дополнительно следует отметить, что все источники имели разную частоту повторения сигналов АЭ, возникших при высоких нагрузках от цикла к циклу, что отражено в таблице 6.10. Такое разнообразие связано с величиной напряженного состояния в наиболее нагруженной зоне и коэффициентом интенсивности напряжений.

Таблица 6.10 – Распределение числа сигналов АЭ, полученных при достижении максимальной нагрузки и выдержки на ней по циклам нагружения

Тип детали	Номер детали	Номер цикла																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Боковые рамы	1531	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	40186	32	0	0	1	9	5	7	4	11	3	1	1	0	4	1	0	0	3	1	0
	2596	2	4	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	84637	1	0	0	1	0	3	0	0	2	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Надрессорные балки	342	15	2	2	0	3	3	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	3	1
	8931	8	9	6	5	3	2	0	1	2	1	0	5	2	1	4	2	0	1	0	0
	21955	6	4	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
	50851	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	2

Таким образом, наблюдение за связью сигналов АЭ с нагрузкой при повторных испытаниях позволяет получать дополнительную информацию о степени развития дефекта и напряженном состоянии в области его нахождения.

Далее определяли суммарные показатели параметров сигналов АЭ для каждой детали: число сигналов за 20 циклов нагружения с разделением сигналов, пришедших на стадии повышения нагрузки и стадии выдержки максимальной нагрузки; суммарную энергию этих сигналов в относительных единицах (рисунок 6.24).

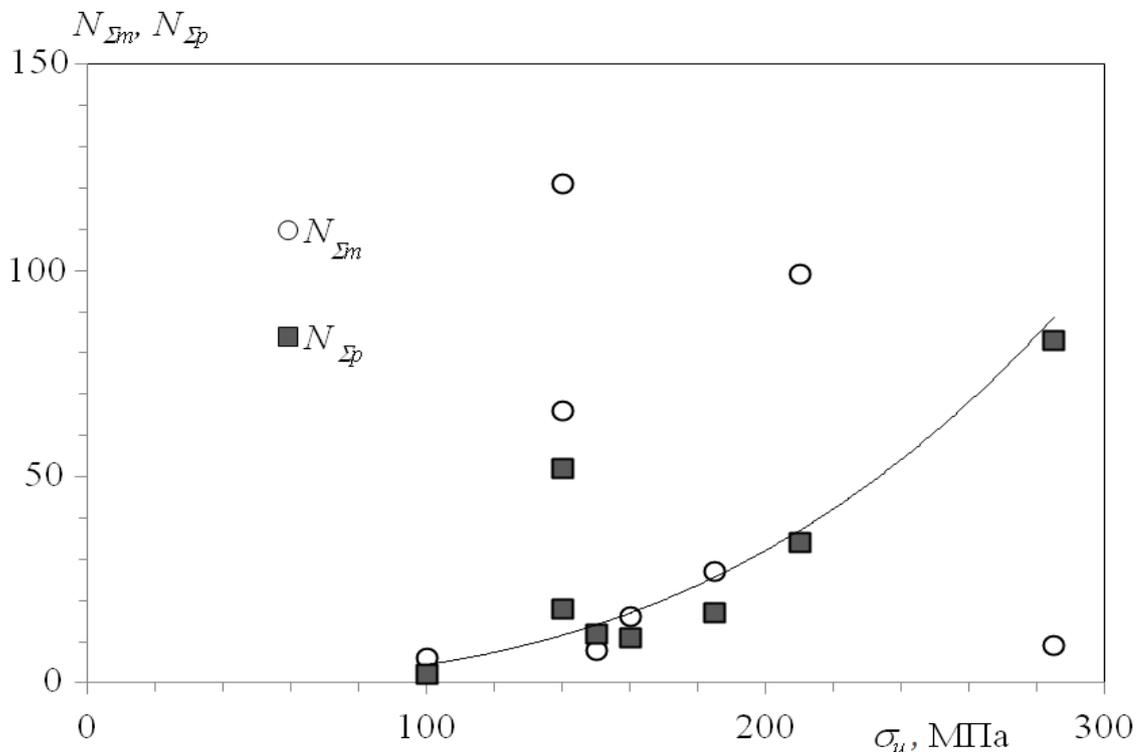


Рисунок 6.24 – Зависимость суммарного числа  $N_{\Sigma m}$  сигналов АЭ при повышении нагрузки и при выдержке максимальной нагрузки  $N_{\Sigma p}$  от напряжения  $\sigma_u$  в сечении детали, в которой находился дефект

Как видно из рисунка 6.24, количество зарегистрированных сигналов АЭ, связанных с трением берегов усталостной трещины, не коррелирует с величиной нагрузки. Этот факт можно объяснить различием типа, размеров, ориентации усталостных трещин относительно прилагаемых нагрузок. В то же время суммарное число сигналов, накопленных за несколько циклов при максимальной нагрузке, обладает достаточно четкой выраженной зависимостью. Если же из рассмот-

рения исключить данные по надressорной балке № 8931, в которой источником являлась продольная усталостная трещина, направленная практически под углом  $90^\circ$  к рассчитываемой максимальной нагрузке, то коэффициент корреляции между напряжениями в сечении расположения источника и общим числом сигналов АЭ составляет 0,95. При этом сама зависимость является степенной с показателем степени, равным 3,28. Аналогичные результаты получены для суммарной энергии, накопленной в этих сигналах. Если же рассматривать результаты только первого испытания, то такой зависимости не обнаруживается.

Полученные результаты показали устойчивую зависимость числа сигналов АЭ и их суммарной энергии, накопленных при повторных испытаниях продолжительностью до 20 циклов, от напряженного состояния и развивающихся источников в реальных литых деталях.

Учитывая, что оба исследованных параметра сигналов АЭ являются основными характеристиками, используемыми в интегральном или интегрально-динамическом критериях оценки состояния опасных производственных объектов, их можно использовать для выработки новых критериев оценки при работе с литыми деталями. При этом необходимо учитывать специфику структурного и напряженного состояния металла литых объектов. Первое обстоятельство при работе с литыми деталям сказывается на более высоком уровне ложных сигналов, связанных с отслоением окалины в поверхностном слое. Второе обстоятельство связано с тем, что в их основных участках, склонных к образованию трещин, деталь работает на изгиб, что также должно сказываться на изменении параметров сигналов АЭ.

Тем не менее были проанализированы кривые связи с напряженным состоянием материала, аналогичные рисунку 6.18, отражающие изменения накопленного суммарного счета сигналов АЭ на стадии нагружения выше 0,8 от максимальной испытательной нагрузки для  $n=1; 3; 5; 10$  и 20 циклов нагружения. Все подвергнутые исследованию кривые имеют наибольший коэффициент корреляции для экспоненциальной зависимости вида:

$$N_{\Sigma} = A \cdot e^{B\sigma}, \quad (6.7)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирически вычисленные коэффициенты, определяющие максимальный коэффициент корреляции зависимости. Основные результаты расчетов сведены в таблицу 6.11.

Далее определяли суммарные показатели параметров сигналов АЭ для каждой детали: число сигналов за 20 циклов нагружения с разделением сигналов, пришедших на стадии повышения нагрузки и стадии выдержки максимальной нагрузки; суммарный счет этих сигналов в относительных единицах (рисунок 6.18).

Таблица 6.11 – Параметры экспоненциальной зависимости, описанные формулой (5.6)

$n$	$A$	$B$	$r_{\sigma N}$
1	0,19	0,174	0,729
3	0,4	0,16	0,642
5	0,48	0,0167	0,687
7	0,6	0,017	0,747
10	0,63	0,0176	0,762
15	1,3	0,0148	0,742
20	1,39	0,0149	0,745

Таким образом, установлено, что АЭ диагностика с выполнением малого числа циклов нагружения позволяет разработать дополнительные комплексные критерии оценки состояния литой детали на базе локально-динамического, интегрально-динамического и интегрального критериев. Для этого необходимо осуществлять суммирование накапливаемых параметров сигналов АЭ (суммарная энергия источника при максимальных нагрузках и его динамическая активность).

Установлено, что оптимальное число циклов равно семи, для него связь параметров напряжений и суммарного счета по всем циклам имеет коэффициент корреляции около 0,75. Аналогичная связь прослеживается для суммарной энергии сигналов АЭ по семи циклам нагружения. Учитывая, что время испытаний

при этом увеличивается на 20–30 %, можно говорить о целесообразности использования такого метода определения напряженного состояния материала в области активных источников АЭ.

На следующем этапе провели АЭ испытания боковых рам с использованием циклического нагружения с контролируемой скоростью деформирования по методике, описанной в работе [276]. Для этого в процессе первоначального статического нагружения регистрировали число сигналов  $N$  и нагрузку  $P_0$  начала линейного участка стационарной акустической эмиссии по графику изменения  $N(P)$  и  $k_0 = \text{tg}(\alpha)$  (рисунок 6.25):

$$N = k_0(P - P_0). \quad (6.8)$$

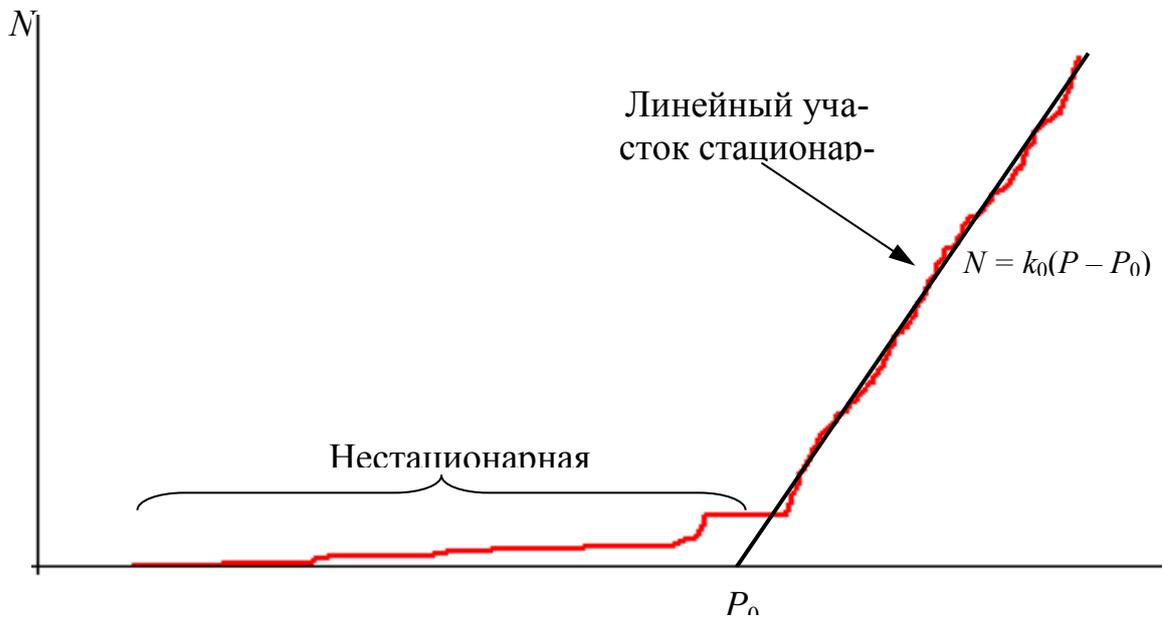


Рисунок 6.25 – График определения активности стационарной АЭ  $P$

Затем проводили циклическое нагружение (рисунок 6.26). Частоту циклического нагружения регулировали в зависимости от максимальной активности сигналов АЭ  $\dot{N}$ :

$$v_{l+1} = v_0 \cdot \frac{\dot{N}_{кр}}{\dot{N}_j + \frac{\dot{N}_{кр}}{2}}, \quad (6.9)$$

где  $l$  – порядковый номер цикла;  $\nu_0$  – начальная частота, соответствующая 0,05 Гц;  $\dot{N}_{кр}$  – критическое значение активности, определенное по формуле (6.7);  $\dot{N}_j$  – значение активности на предыдущем интервале циклического нагружения.

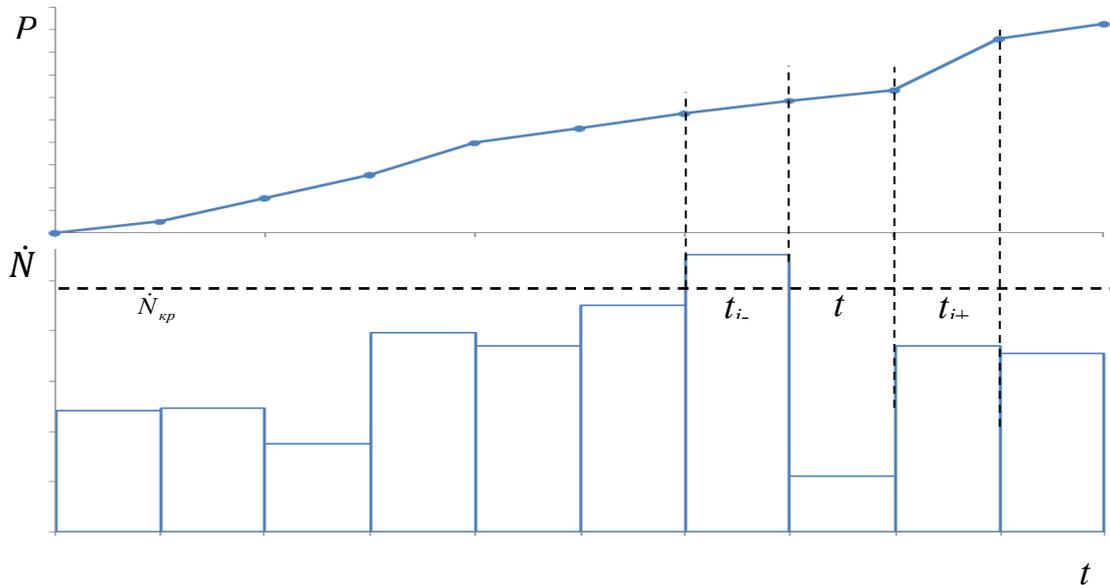


Рисунок 6.26 – Принцип регистрации активности и нагрузки в интервалы времени испытания

Для испытания были отобраны детали с видимыми литейными дефектами – потенциальными источниками АЭ. Результаты контроля боковых рам по данной схеме приведены в таблице 6.12. Представленные результаты показывают, что нагружение с малым числом циклов для литых деталей с неоднородной структурой позволяет повысить достоверность определения состояния развивающихся источников АЭ.

Варьирование скорости нагружения в зависимости от активности источников АЭ снижает риск пропуска сигналов и повышает надежность оценки деталей при испытаниях

Таблица 6.12 – Результаты диагностирования боковых рам грузовых вагонов при величине базовой статической нагрузки, равной 387 кН, и  $k_{кр} = 0,43$

Зав. № детали	Число сигналов	$k_{0\text{ ст}}$ , 1/ кН	$k_{0\text{ ц}}$ , 1/ кН	$P_{0\text{ ц}}$ , кН	Количество циклов $\Delta n$	Результат контроля
T103	6	0,015	0,07	441	40	Годная
8752	10	0,026	0,16	441	40	Годная
19644	4	0,08	0,11	441	40	Годная
25036	8	0,17	0,27	441	40	Годная
53104	9	0,18	0	441	40	Годная
25969	16	0,4	0,66	405	20	Брак
T91013	7	0,18	0,48	441	40	Брак
8172	17	0,68	–	–	–	Брак
79151	16	0,32	0,55	387	10	Брак
6492	19	0,44	–	–	–	Брак
6667	17	0,36	1,62	405	20	Брак
66991	20	0,44	–	–	–	Брак

### Выводы по шестой главе

Разработанные методики регистрации и обработки сигналов АЭ были успешно применены для идентификации опасных развивающихся дефектов в боковых рамах и надрессорных балок тележек вагонов.

Анализ результатов контроля литых деталей показал, что разные детали и их отдельные участки сильно отличаются по уровню сигналов помех, к тому же

часть из них имеют локальный характер и требуют применения надежных методов идентификации.

Проведены АЭ исследования деталей с реальными, обнаруженными другими методами, трещинами, дефектами литья и участками, отремонтированными сваркой и наплавкой.

Результаты применения корреляционного анализа сигналов показали, что он позволяет надежно выявлять развивающиеся трещины. Однако часть дефектов наплавки и сварки не являются магистральными трещинами, а участками с дефектной структурой, что характеризуется большим разбросом отдельных сигналов на локационном поле. Для такого типа дефектов целесообразно использовать интегрально-динамический критерий и энергетический интегрально-динамический критерий.

Кроме того, для оценки источников в литых деталях по энергии использовали коэффициент нагрузки, позволяющий разделять источники на три типа с точки зрения напряженного состояния участков детали.

По результатам контроля АЭ и другими методами НК деталей с литейными дефектами установлено, что только часть литейных дефектов бракуется другими штатными методами контроля. Как подтверждается другими исследователями [272], только часть трещиноподобных дефектов являются активными, потенциально опасными источниками. Но другая часть литейных дефектов не развивается и их потенциальная опасность низка. Последующая опытная эксплуатация деталей в вагонах, работающих в замкнутых маршрутах, с наблюдением за этими дефектами подтвердила надежность АЭ диагностики.

Предложен алгоритм распознавания развивающихся трещин и других активных источников АЭ с использованием корреляционных коэффициентов, характеризующих стабильность или изменчивость источника с точки зрения механизмов первичной АЭ в этом источнике.

Установлено, что АЭ диагностика с выполнением малого числа циклов нагружения позволяет повысить надежность оценки состояния литых деталей с

использованием модифицированных локально-динамического и интегрально-динамического критериев.

Экспериментально определено, что оптимальное число циклов при нагружении может быть не более десяти. Для этого числа циклов связь параметров напряжений и суммарного счета по всем циклам имеет достаточно высокий коэффициент корреляции. Аналогичная связь прослеживается для суммарной энергии сигналов АЭ. Дополнительное использование переменной скорости нагружения минимизирует потери АЭ и повышает достоверность контроля.

## ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Накопленный опыт применения АЭ метода, даже для таких сложных деталей, как боковые рамы и наддресорные балки, позволяет опробовать модели оценки их состояния по результатам диагностики этим методом. Тем более что эта проблема представляет большой прикладной интерес, так как существенная разница в условиях эксплуатации, конструкции, материалах и условиях изготовления приводит к большому разбросу вероятностей выхода таких деталей из строя.

Низкая контролепригодность литых деталей тележки грузового вагона и, более того, переменная контролепригодность для разных деталей требует рассмотрения вопроса оценки ресурса разными способами.

В первом случае будем ориентироваться на разработку методики определения ресурса изделия при совместном использовании АЭ метода с другими методами НК. Во втором случае рассмотрим возможность определять состояние деталей на основании только АЭ данных.

При рассмотрении вопроса определения ресурса для эксплуатируемых деталей подвижного состава железной дороги следует отметить, что категория ресурса, измеряемого в количестве циклов нагружения для этих ОК использовать не целесообразно. Это связано с тем, что детали испытывают неравномерные нагрузки. Поэтому при оценке параметров ресурса для литых деталей тележек грузовых вагонов целесообразно говорить о прогнозируемом времени эксплуатации или о прогнозируемом ресурсе, измеренном в километрах. При этом надо понимать, что при наличии одного дефекта колеса на километр перемещения вагона приходится около 330...370 циклов нагружения ударной нагрузки на боковую раму.

## **7.1. Разработка модифицированной интегральной методики оценки состояния литых деталей**

### **7.1.1. Использование акустико-эмиссионного контроля для определения последующего срока эксплуатации литых деталей**

Литые детали тележки контролируются при деповском и капитальном ремонте на ремонтных предприятиях с разбором тележки. Дефектоскопию деталей проводят магнитными методами, в частности феррозондовым и вихретоковым. Кроме того, при использовании АЭ метода проводится механическое нагружение деталей, что дополнительно позволяет применить тензометрию для оценки состояния деталей. Поэтому предлагаемая методика оценки базируется на совместном применении АЭ метода с перечисленными способами НК.

Основными задачами системы оценки безотказной работы детали будем считать следующие:

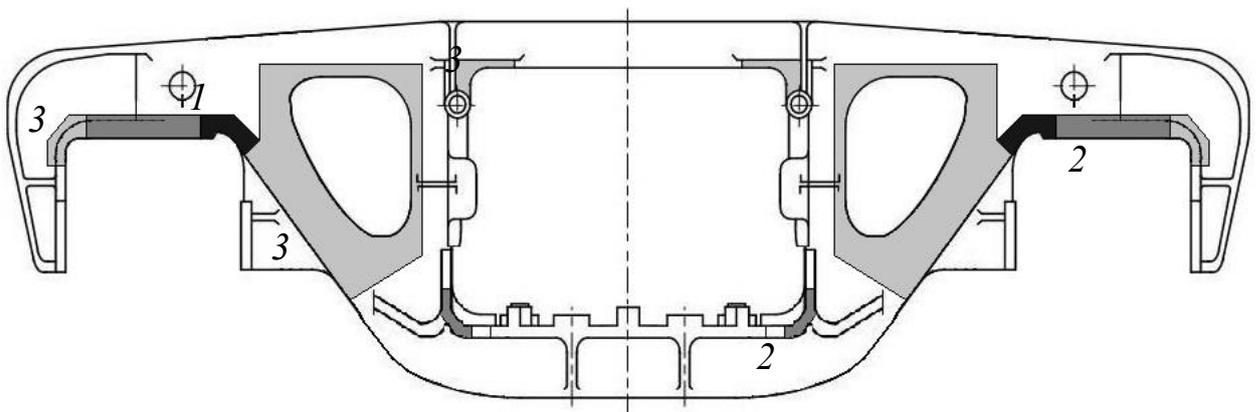
- а) поиск потенциально опасных локальных участков;
- б) ранжирование обнаруженных потенциально опасных участков по степени развития дефектов на них;
- в) оценка срока безотказной эксплуатации на основании полученных сведений об объекте.

Высокой достоверности диагностики можно достичь при наличии информации о дефектности деталей. Поэтому в случае ответственных деталей подвижного состава применена комплексная методика, которая определяет наличие макроскопических дефектов и величину нагрузки на диагностируемый участок, а также степень их активности при приложении нагрузки, превышающей рабочую динамическую на 25 %.

Методика АЭ контроля с целью продления эксплуатации объекта на конкретный срок эксплуатации была предложена в работах [277–279].

Суть методики заключается в том, что исходя из статистических данных, вся деталь разбивается на участки различной степени потенциальной опасности. В нашем случае мы опирались на исследования, приведенные во второй главе, и исходили из двух параметров: доли данного участка, бракуемой по наличию усталостной трещины, и оценки скорости роста трещины. Учитывая эти критерии, боковая рама и надрессорная балка были разделены на участки, приведенные на рисунке 7.1.

а)



б)

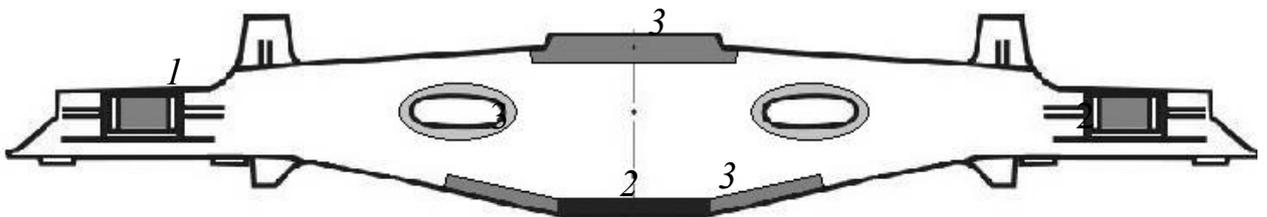


Рисунок 7.1 – Участки контроля на боковой раме (а) и надрессорной балке (б)

Приведенные на рисунке 6.1 зоны подразделяются на четыре категории: самым темным цветом (1) обозначены наиболее опасные участки, для которых критерии оценки самые жесткие, это внутренние углы буксового проема боковой рамы, бурты наклонных плоскостей и средняя часть нижнего пояса надрессорной балки. Остальные зоны по мере убывания опасности окрашены в более светлый цвет (2, 3). Основной объем металла цветом не выделен и к нему наименьшие требования.

При определении критериев оценки на основании исследований образцов и результатов контроля деталей с развивающимися трещинами. Как показали результаты, наиболее надежным параметром может служить суммарная энергия сигналов АЭ из локального источника, а также коэффициент корреляции между сигналами источника. Для диагностирования деталей с целью продления срока эксплуатации будем использовать среднее значение коэффициента корреляции. Кроме того, при нагружении контролируемых деталей нагрузкой, превышающей на 20–25 % рабочую, необходимо измерять напряжения или нагрузку для определения весового коэффициента для энергии сигналов. Таким образом, добиваемся слабого влияния энергии сигналов АЭ, принятых при малых нагрузках.

Для определения энергетического параметра воспользуемся исследованиями образцов с учетом затухания в материале. Для этого применены данные исследования АЭ одного из образцов, исследованных в разделе 3.5. Анализировали данные образца, который не имел внутренних дефектов литья на пути трещины и данные которого наиболее совпадали с значениями, близкими к линии тренда. При обработке результатов нагружения образцов с концентраторами получаем зависимость энергетического параметра, учитывающего величину нагрузки относительно максимальной, приведенную на рисунке 7.2.

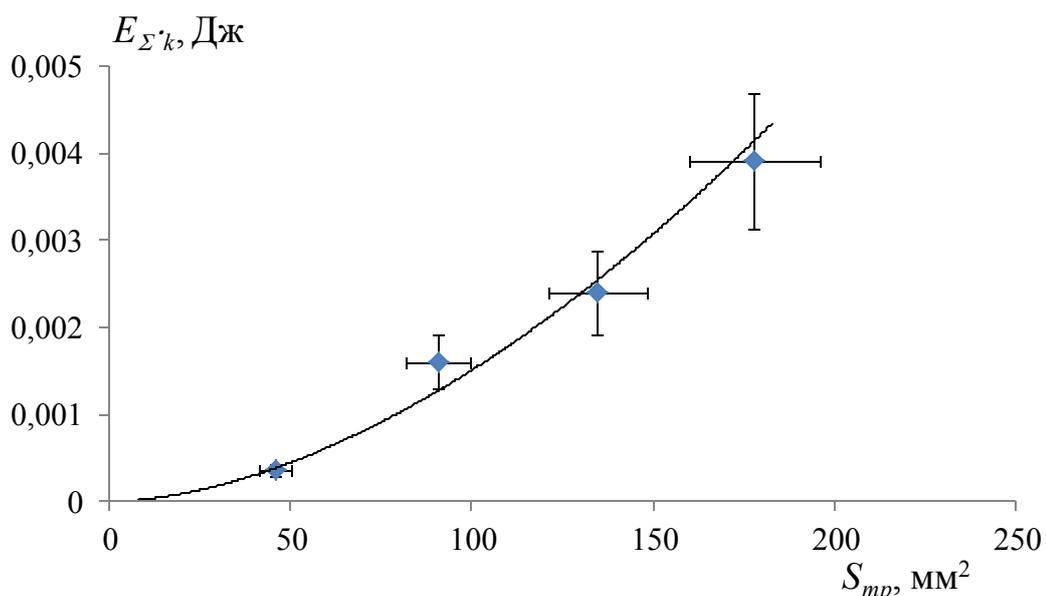


Рисунок 7.2 – График зависимости суммарной энергии сигналов АЭ с учетом коэффициента нагрузки от площади развития трещины

Такое взвешенное значение суммарной энергии  $E_{\Sigma k}$  определяется формулой:

$$E_{\Sigma k} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \frac{P_i}{P_{\max}}, \quad (7.1)$$

где  $E_i$  – энергия  $i$ -го сигнала  $P_i$  и  $P_{\max}$  – соответственно нагрузка при приеме  $i$ -го сигнала и максимальная в испытаниях;  $n$  – число сигналов акустической эмиссии в источнике.

А связь такой суммарной энергии  $E_{\Sigma k}$  с КИН будет, исходя из формулы 3.24:

$$E_{\Sigma k} = A \cdot K^n, \quad (7.2)$$

где  $A$  – энергетический коэффициент. Учитывая, что для рассматриваемых в качестве объектов – литых деталей сложной формы, напряжения во всех наиболее нагруженных участках изгибные – КИН определяется по формуле:

$$K_1 = \frac{Y_1 \cdot F \cdot \sqrt{\pi \cdot l}}{S}, \quad (7.3)$$

где  $F$  – сила, прикладываемая при изгибе;  $S$  – площадь изгибаемого сечения;  $l$  – длина трещины;  $Y_1$  – коэффициент, имеющий полиномиальную зависимость от относительной к общей изгибаемой толщине длины трещины (для большей части развивающейся трещины он в случае контроля литых деталей изменяется в пределах 5,5...7). Тогда энергия в каждом отдельном сечении будет зависеть не только от величины трещины, но и от величины нагрузки  $F$ , при этом для каждой координатной точки можно автоматически учитывать сечение:

$$E_{\Sigma k} = E_m \cdot F^n \cdot l^{n/2}, \quad (7.4)$$

где  $E_m$  – обобщенный эмпирический коэффициент при степенной зависимости. Тогда для внутреннего угла буксового проема при относительно малом развитии трещины (когда ее площадь  $\approx 0,05S$ ) при максимальной для испытаний нагрузке 550 кН –  $E_m \approx 1,4 \cdot 10^{-16}$ , а  $n \approx 3,5$ .

Используя формулу (7.4), можно определить, что при развитии трещины даже на  $1 \text{ мм}^2$  возможна регистрация сигнала от источника с амплитудой, превышающей порог срабатывания системы на 15...17 дБ, если чувствительность соответствует той, которая была при исследовании образцов, и расстояние до источника будет аналогичным. Эти значения достижимы и вполне реализуемы, в том

числе в деповских условиях, поэтому в дальнейшем будем считать чувствительность аналогичной или приводить ее к этому значению.

Однако штатными методами контроля выявляются плоские дефекты типа трещин площадью не менее  $5 \text{ мм}^2$ , к тому же ими невозможно определить развивается дефект или нет. Как показывают результаты внеплановых отцепок вагонов, такой чувствительности для наиболее опасных зон *I* по рисунку 6.1 недостаточно, так как в этих зонах трещины могут развиваться до разрушения в полноценный межремонтный период, поэтому в зонах *I* энергетический параметр должен быть минимально возможным. В связи с этим для зон *I* энергетический параметр приемлем равным 0,01 Дж. В зонах *2* и *3* значение энергетического параметра будет соответственно 0,03 и 0,05 Дж. В остальных частях детали энергетический параметр принимаем равным 1, что соответствует площади развивающейся трещины  $7,2 \text{ мм}^2$ . Однако это предельное состояние  $E_{\min}$ , которое рассчитано на максимальный срок эксплуатации деталей. Если же срок эксплуатации детали будет сокращен, то для энергетического критерия возможно повышение значения.

Далее используем корреляционный параметр, но его будем применять в привязке к энергии тех сигналов, коэффициент взаимной корреляции для которых будем определять. Кроме того, дополнительно будем учитывать и весовой коэффициент нагрузки. Таким образом, корреляционный параметр определим по формуле

$$Q_{xy} = \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i \neq j}} \left\{ \left( \frac{E_i + E_j}{2} \right) \cdot \frac{P_j}{P_{\max}} \cdot k_{ij} \right\}, \quad (7.5)$$

где  $Q_{xy}$  – интегральная характеристика корреляции *x*-го источника сигнала акустической эмиссии в *y*-й зоне детали для двух соседних по времени прихода сигналов;  $k_{ij}$  – коэффициент корреляции между сигналами акустической эмиссии *i* и *j*;  $P_j$  – нагрузка во время регистрации сигнала, который был при большей нагрузке из пары.

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 7.1.

Таблица 7.1 – Категории опасности источников АЭ в зависимости от полученных значений интегральных характеристик

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

В работе [277] этот способ рекомендуется использовать с измерением напряженно-деформированного состояния деталей с помощью тензометрирования, но, как показала дальнейшая практика, он вполне работоспособен и при использовании других подтверждающих наличие дефектов методов НК.

Для такого подхода к определению срока эксплуатации деталей следует определить не только максимальное недопустимое значение энергетического параметра, но и значение  $E_{\max}$  – максимальное пороговое, а также аналогичные значения для корреляционного критерия и смысл качественных определений источников, приведенных в таблице 7.1.

По классификации дефектов будем исходить из того, что чем опаснее дефект, тем короче срок его эксплуатации. Статистические исследования, проведенные во второй главе, показывают, что трещины малых размеров не всегда являются развивающимися и АЭ контроль при обеспечении должного уровня чувствительности способен адекватно разделить развивающиеся и неразвивающиеся трещины. Кроме того, если активный дефект, зарегистрированный АЭ методом, имеет параметры менее максимальных, значит, он развивается медленнее в силу отсутствия на пути литейных дефектов структуры или пониженном напряженном состоянии в силу, например, большей толщины стенок в конкретной контролиру-

емой детали. Как показывают статистические исследования разрушений деталей в наиболее опасных участках, все они развивались в течение достаточно длительного времени эксплуатации. На рисунке 7.3 приведена гистограмма распределения изломов по километражу  $w$ , который был пройден вагоном с разрушенной деталью от последнего освидетельствования, когда дефекта еще не было. Следует отметить, что нормативный километраж между деповскими ремонтами составляет 160 тыс. км, за исключением дополнительных условий.

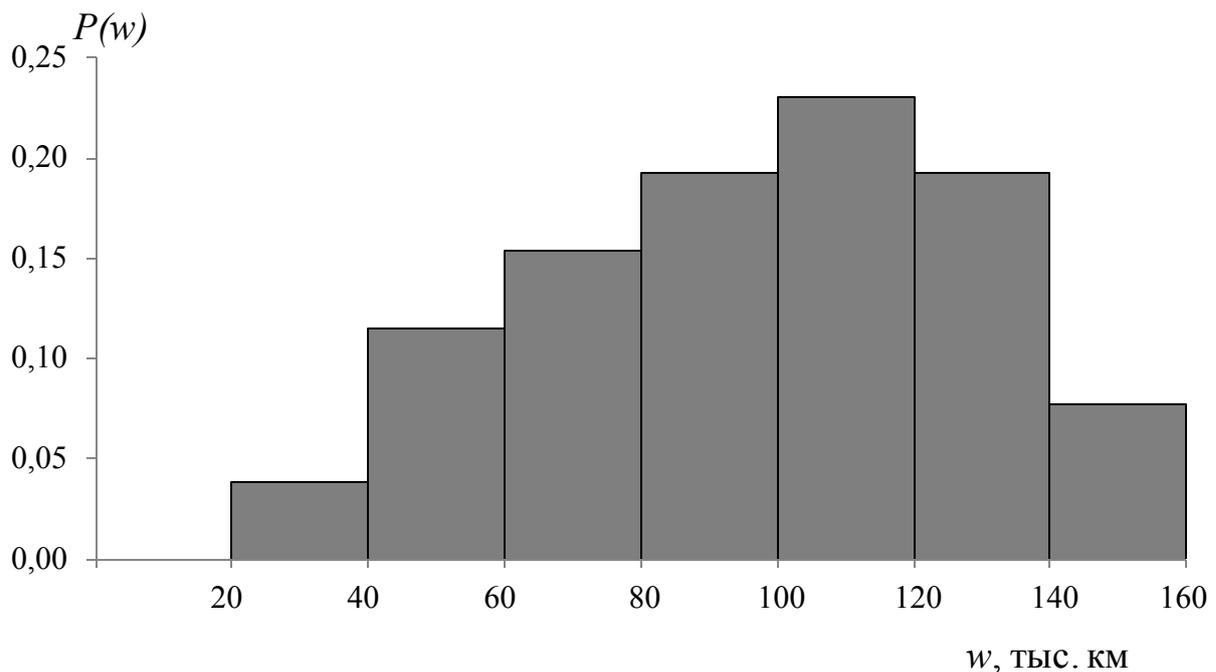


Рисунок 7.3 – Распределение вероятности разрушения боковых рам по наличию развивающейся трещине во внутреннем углу буксового проема в зависимости от пробега вагона от последней диагностики

Полученные данные показывают, что скрытые дефекты малых размеров развиваются в среднем дольше, чем половина времени межремонтного пробега, при котором осуществляется НК деталей. Из этого можно заключить, что, повысив пороговые значения критериев оценки литых деталей до значений, эквивалентных обнаруживаемых магнитными методами, можно снизить срок гарантированной эксплуатации в два раза. При этом количество разрушений может быть снижено минимум на 70 %. Приведенные на рисунке 7.3 распределения показывают, что возможно принципиальное разбиение межремонтного срока эксплуатации при продлении ресурса детали на доли, что в ряде случаев экономически

удобно для собственников деталей, при этом вероятность разрушения будет низкой. В нашем случае АЭ диагностирования состояния литых деталей тележек грузовых вагонов разобьем межремонтный пробег вагонов на доли 0,25, 0,5 и 0,75, соответствующие значительным, малозначительным и незначительным источникам сигналов АЭ.

Далее установили пороговые значения критериев оценки  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ,  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  на основании тех же экспериментальных данных, которые использовали для предельного энергетического критерия. Дополнительно проведены испытания деталей с различной толщиной опорной поверхности буксового проема, изнашиваемой в процессе эксплуатации. Эти испытания позволили разделить детали по степени напряженно-деформированного состояния и динамике изменения значимых параметров сигналов для различных источников АЭ. В результате исследований были выбраны значения пороговых параметров для всех типов зон контроля, которые представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Критерии оценки состояния боковых рам и надрессорных балок для дискретного способа оценки устанавливаемого продленного пробега

Зона	$E_{\min}$ , мДж	$E_{\max}$ , мДж	$Q_{\min}$ , мДж	$Q_{\max}$ , мДж
1	0,1	0,3	0,1	0,2
2	0,3	1,0	0,2	0,4
3	0,5	1,5	0,3	0,6
4	1	3	0,5	1,0

Способ был опробован на нескольких десятках боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов. Каждую деталь нагружали двумя видами нагрузки: продольное растяжение и трехточечный изгиб для боковых рам и трехточечный изгиб в направлении вверх и вниз для надрессорных балок. При диагностировании деталей о их состоянии судили по источнику с наибольшим определенным значением энергетического критерия.

При испытаниях такого способа продления ресурса деталей использовали детали с различными дефектными состояниями. Были отобраны детали четырех категорий:

- а) имеющие трещины различной длины и происхождения (например, усталостные, горячие);
- б) имеющие литейные объемные дефекты (раковины, выходящие на поверхность, пористости, неслитины, утяжины);
- в) имеющие износы в ответственных узлах, увеличивающие напряжения на этих участках;
- г) бездефектные детали (в которых визуальным и магнитными методами дефекты не были обнаружены).

В таблице 7.3 приведены обобщенные результаты диагностирования литых деталей, общее количество которых 50. В таблицах 7.4 и 7.5 данные соответственно боковых рам и надрессорных балок, в которых присутствуют значимые локализованные источники, имеющие более одного сигнала из области нахождения дефекта.

Таблица 7.3 – Общие результаты представленных к диагностированию литых деталей тележки грузовых вагонов

Группы деталей	Боковые рамы		Надрессорные балки	
	Всего, шт.	Идентифицированные дефекты, шт.	Всего, шт.	Идентифицированные дефекты, шт.
<i>а</i>	8	7	3	3
<i>б</i>	5	3	2	0
<i>в</i>	16	2	3	1
<i>г</i>	11	0	12	2

Таблица 7.4 – Результаты ресурсных АЭ испытаний боковых рам с локализованными активными источниками

№ детали	Участок детали	$N_x$	$E_{\Sigma k}$ , мДж	$Q_{ij}$ , мДж	Вид дефекта	Назначенный ресурс от максимального, %
25425	Бок. плоскость техн. окна	10	16,74	7,14	Критический	0
2670	Верхн. угол техн. окна	5	5,83	0,14	Незначительный	75
16422	Нижний угол техн. окна	4	29,13	7,61	Критический	0
62997	Внутр. угол букс. проема	8	8,99	3,79	Критический	0
15534	Верхн. угол техн. окна	5	17,99	7,45	Критический	0
21347	Верхн. плоск. техн. окна	2	4,3	0,12	Незначительный	75
15885	Боковая плоск. техн. окна	8	6,97	2,99	Критический	0
62884	Внутр. угол букс. проема	4	0,06	0,04	Незначительный	75
10088	Наружн. угол букс. проема	5	7,79	2,78	Критический	0
12979	Внутр. угол букс. проема	2	0,01	0,01	Незначительный	75
846	Внутр. угол букс. проема	6	0,5	0,14	Значительный	25

Таблица 7.5 – Результаты ресурсных АЭ испытаний надрессорных балок с локализованными активными источниками

№ детали	Участок детали	$N_x$	$E_{\Sigma k}$ , Дж	$Q_{ij}$ , Дж	Вид дефекта	Назначенный ресурс от максимального, %
58634	Наклонная плоскость	3	26,1	0,04	Малозначительный	75
45452	Наклонная плоскость	34	18,4	0,9	Критический	75
6303	Наклонная плоскость	5	1,3	0,08	Малозначительный	75
7139	Опорная поверхность подпятника	8	0,81	0,11	Незначительный	100
9942	Нижний пояс	12	0,26	0,12	Значительный	25
49452	Наклонная плоскость	6	0,64	0,17	Незначительный	100

Как видно из общих данных, почти все трещины являлись активными источниками. Только одна трещина не являлась развивающейся и не излучала АЭ. Дальнейшее ее исследование с вырезкой и доломом образца, содержащего эту трещину, показало, что она являлась горячей и не развивалась вообще. В остальных случаях (б, в и г в таблице 7.3) только некоторые детали имели активные источники АЭ, которые можно было классифицировать по данной методике. Из годных по результатам других методов контроля деталей только одна надрессорная балка была забракована.

После испытаний детали, допущенные к дальнейшей эксплуатации, были использованы в течение назначенного по результатам прогнозирования срока в замкнутом маршруте.

После опытной эксплуатации была проведена дополнительная АЭ диагностика, которая показала, что незначительные и малозначительные источники в дальнейшем не были проявлены в результатах АЭ и детали были вновь отданы в эксплуатацию.

У боковой рамы № 846, имеющей единственный значительный дефект (панель локализации источника системой АЭ приведена на рисунке 7.4), при повторной диагностике этот источник вновь излучал сигналы АЭ, а деталь была выведена из дальнейшей эксплуатации.

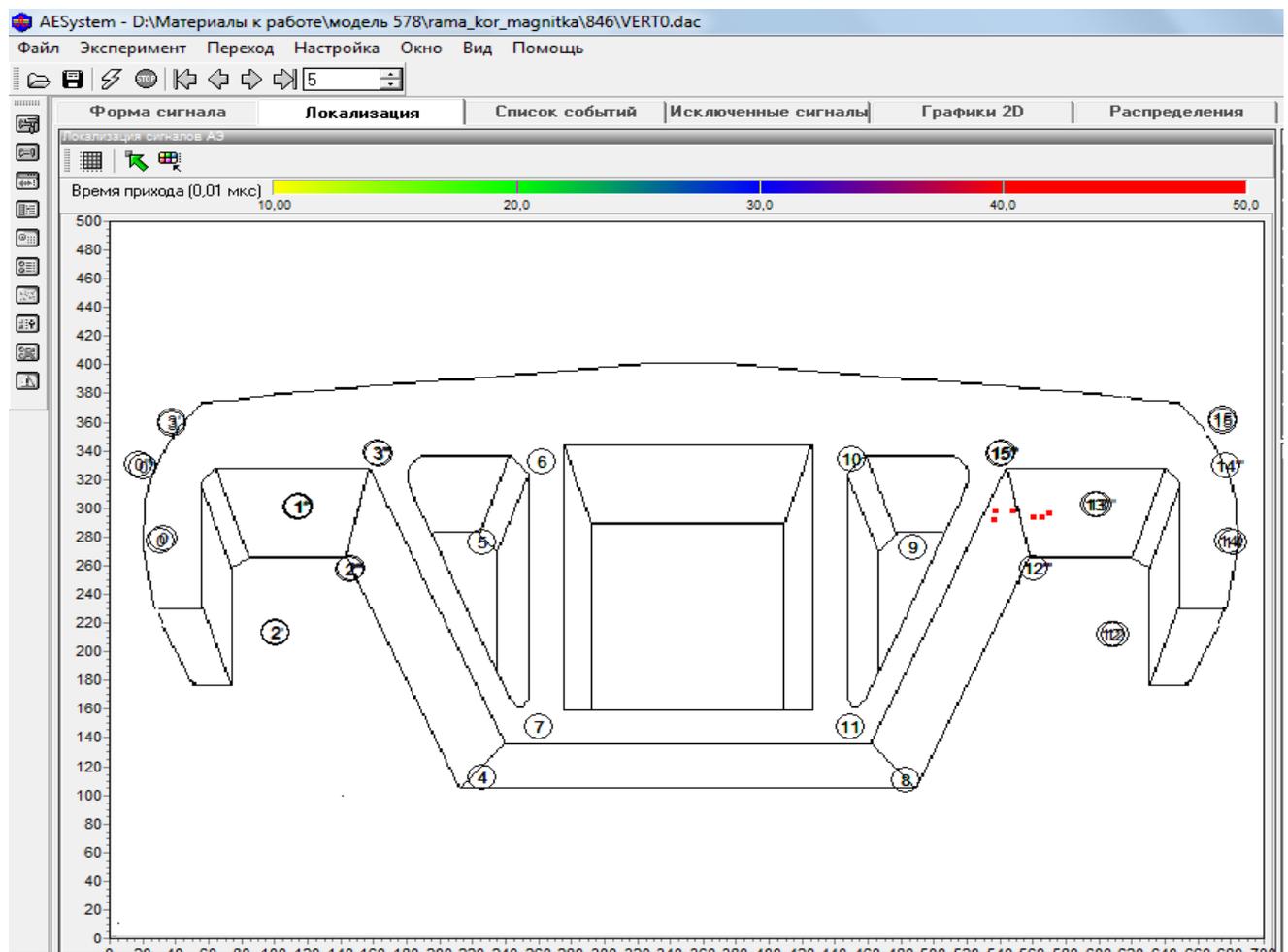


Рисунок 7.4 – Локализация дефекта во внутреннем углу буксового проема боковой рамы № 846

В целом можно отметить, что грань между малозначительными и значительными источниками наиболее тонкая и дальнейшие применение этого критерия для литых деталей показало, что детали со значительными дефектами, опре-

деленными по данной методике, встречаются реже всего. Также последующий набор результатов диагностирования литых деталей показывает, что надрессорные балки имеют активные источники примерно в два раза чаще, чем боковые рамы.

### **7.1.2. Применение тензометрии совместно с акустико-эмиссионным методом при оценке состояния деталей**

В работах [277, 278, 280] предложено использовать тензометрический метод в дополнение к АЭ методу диагностирования параметров ресурса деталей, опробованный на боковых рамах и надрессорных балках во время испытаний АЭ методом.

Так как в процессе АЭ контроля используется механическое нагружение литых деталей, то измерение дополнительно напряжений в ключевых точках деталей осуществляется с помощью тензодатчиков. Для осуществления этого метода необходимо в точках измерения напряжений провести предварительные измерения на не менее чем десяти бездефектных деталях и определить среднее значение напряжения в точках измерения в каждой оцениваемой зоне. Далее, при измерениях напряжений в контролируемых деталях определяется отклонение напряжений от средних значений для каждого сектора изделия по формуле

$$\Psi_{\alpha} = \frac{\sigma_{0\alpha} - \sigma_{p\alpha}}{\Delta \sigma_{0\alpha}}, \quad (7.6)$$

где  $\alpha$  – номер сектора, в котором установлен тензодатчик;  $\sigma_{p\alpha}$  – напряжение на контролируемом изделии в секторе  $\alpha$ ;  $\sigma_{0\alpha}$  – среднее значение напряжений в секторе  $\alpha$  на бездефектных изделиях;  $\Delta \sigma_{0\alpha}$  – доверительный интервал напряжения для тензодатчика, установленного на фиксированном месте в секторе  $\alpha$  изделия и рассчитанный по результатам измерений для каждого тензодатчика на десяти бездефектных изделиях с вероятностью  $P = 0,95$ .

Степень дефектности участка по отклонению напряжений определяют в соответствии с таблицей 7.6.

Таблица 7.6 – Категории опасности изделия, определенные по результатам тензометрических измерений напряжений в детали в зависимости от значения критерия отклонения напряжений  $\sigma_0 - \sigma_i / \Delta\sigma_0$

Степень опасности дефекта	Значение отклонений механических напряжений	Назначаемое дополнительное время эксплуатации до следующей диагностики, % от максимально возможного
Дефекта нет	$<0,5\Delta\sigma_0$	100
Незначительный	$(0,5...1)\Delta\sigma_0$	75
Малозначительный	$(1...2)\Delta\sigma_0$	50
Значительный	$(2...3)\Delta\sigma_0$	25
Критический	$>3\Delta\sigma_0$	0

Полученное численное значение отклонения напряжений, зафиксированное каждым тензодатчиком, дополнительно характеризует перераспределение напряжений на участке диагностирования и в зависимости от величины  $\Psi_\alpha$  источнику присваивается соответствующий критерий опасности и определяется назначенное время эксплуатации до следующего контроля.

Способ с использованием результатов тензометрии для определения параметров ресурса литых деталей был опробован на 20 боковых рамах грузовых вагонов, а результаты измерений приведены в таблице 7.7 и 7.8, где  $T_9$  – назначенный срок эксплуатации в % от максимально допустимого.

Таким образом, приведенный тензометрический способ повышает надежность оценки параметров ресурса при совместном использовании с АЭ методом диагностики.

Таблица 7.7 – Детали, в которых были идентифицированы дефекты, влияющие на дополнительный срок эксплуатации при продольном растяжении (при пороговых значения критериев:  $S_{\min} = 5$ ,  $S_{\max} = 20$ ,  $Q_{\min} = 1$ ,  $Q_{\max} = 3$ )

№	Зона	$\sigma_{0\alpha}$	$\Delta\sigma_{0\alpha}$	$\sigma_{p\alpha}$	$\Psi_{\alpha}$	Степень опасности	$T_{\alpha}$ , %
11095	Внешний угол 1	4,39	0,26	4,17	0,85	Незначительный	50
94425	Внешний угол 1	4,39	0,26	4,71	1,23	Малозначительный	25
16422	Верхняя плоскость техн. окна	0,65	0,28	0,45	0,74	Незначительный	75
3482	Опорная поверхн. буксового проема	3,84	0,34	3,48	1,05	Малозначительный	50

Таблица 7.8 – Детали, в которых были идентифицированы дефекты, влияющие на дополнительный срок эксплуатации при трехточечном изгибе (при пороговых значения критериев:  $S_{\min} = 5$ ,  $S_{\max} = 20$ ,  $Q_{\min} = 2$ ,  $Q_{\max} = 5$ )

№	Зона	$\sigma_{0\alpha}$	$\Delta\sigma_{0\alpha}$	$\sigma_{p\alpha}$	$\Psi_{\alpha}$	Степень опасности	$T_{\alpha}$ , %
25425	Бок. плоскость техн. окна	2,23	0,36	1,49	2,05	Критический	0
2670	Верх. угол техн. окна	4,45	0,47	4,69	0,51	Малозначительный	75
16422	Нижний угол техн. окна	9,7	0,54	8,04	3,07	Критический	0
15534	Верх. угол техн. окна	4,45	0,47	4,16	0,62	Малозначительный	0
62997	Внутренний угол букс. проема	8,59	0,59	8,19	0,68	Малозначительный	0
21347	Верхняя плоскость техн. окна	2,62	0,34	2,47	0,44	–	100
15885	Боковая плоскость техн. окна	2,23	0,36	2,01	0,61	Малозначительный	25

## 7.2. Разработка вероятностной модели оценки ресурса с использованием распределения Вейбулла

Многочисленные экспериментальные исследования усталостной долговечности образцов, одни из которых приведены в [281, 282], и реальных объектов [283, 284] показывают, что оценивать перспективу развития дефектов вплоть до разрушения объекта можно только с учетом статистических моделей. Это связано в первую очередь с невозможностью полного учета структурного состояния материала в направлении развития дефекта, на что указывает ряд авторитетных авторов [285-287]. Поэтому, даже имея информацию о дефектности объекта, сложно говорить об остаточном ресурсе или сроке эксплуатации, не используя вероятностные модели прогнозирования состояния объектов [286, 287].

Учитывая достоинства комплексного контроля, включающего методы обнаружения макроскопических дефектов с оценкой размеров, конфигурации, местоположения этих дефектов, и методы оценки склонности к развитию, можно использовать вероятностную оценку состояния объекта. Тогда полный алгоритм оценки очевиден, он распространен в исследовательской среде [282, 283, 285] и включает следующие этапы:

- предварительный анализ напряженного состояния участков объекта под рабочими нагрузками;
- поиск наиболее эффективными методами дефектов, снижающих усталостную долговечность объекта;
- оценка параметров обнаруженных дефектов, влияющих на усталостную долговечность;
- определение остаточного ресурса или срока службы объекта на основе вероятностного подхода.

При этом до сих пор мало внимания уделялось интеграции в вероятностные модели оценки ресурса изделий результатов неразрушающего контроля, в частно-

сти метода АЭ, хотя перспективы этого подхода, основанные на связи развивающихся дефектов и параметрами этого метода, указывались неоднократно различными авторами [4, 286]. Тем не менее, вероятностная модель описывает в первую очередь влияние структурного и напряженного состояния материала на параметры надежности. Неразрушающие методы диагностики же применимы только в связи этих характеристик состояния с характеристиками, измеряемыми в ходе диагностики.

За основу рассуждений возьмем одно из распределений, описывающее вероятность  $P$  времени безотказной работы  $t$  (для упрощения предположим, что число циклов механического нагружения в единицу времени – величина постоянная). Такое распределение можно считать непрерывным, так как в зависимости от размеров дефекта и напряженного состояния участка, на котором он находится, разрушение теоретически может произойти в любой момент времени, величины, считающейся непрерывной. Кроме того, оценку состояния объекта проводят, когда он еще пригоден к использованию, т.е. распределение не может быть симметричным во времени, а имеет смысл только во временной области  $t > 0$ . Наиболее широко для решения поставленной задачи применяется отвечающее указанным требованиям распределение Вейбулла [287, 288]:

$$P(t) = \exp \left( - \frac{t^\alpha}{\theta} \right); \quad (7.7)$$

где  $\alpha$  и  $\theta$  – параметры (коэффициенты) смещения и масштаба соответственно, параметр  $\alpha > 0$ . Очевидно, что изменение этих коэффициентов в процессе эксплуатации объекта влечет за собой уменьшение вероятности безотказной работы и среднего времени наработки до отказа:

$$t_{cp} = \theta^{1/\alpha} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right). \quad (7.8)$$

Таким образом, параметры  $\alpha$  и  $\theta$  зависят от физико-механических свойств объекта, влияющих на долговечность его работы.

Если вероятность безотказной работы объекта задавать как постоянную величину  $P_0$ , отвечающую заданному уровню безопасности, то время безотказной работы можно выразить из формулы (7.5):

$$t = \sqrt[\alpha]{-\theta \cdot \ln(P_0)}. \quad (7.9)$$

При такой постановке задачи встает вопрос корректного определения коэффициентов распределения и уровня вероятности безотказной работы. Задаваемый уровень безотказной работы должен диктоваться для организации, эксплуатирующей объект или отвечающей за его безопасность, технико-экономическими соображениями. С физической же точки зрения интерес представляют параметры  $\alpha$  и  $\theta$ , которые можно считать интегральными характеристиками, описывающими усталостную долговечность объекта.

Рассмотрим подробнее влияние параметров  $\alpha$  и  $\theta$  на остальные характеристики распределения. Следует отметить, что эти параметры взаимозависимы, т.е. на них влияют одни и те же факторы состояния объекта. Дополнительно следует отметить, что с точки зрения продления срока безопасной эксплуатации объекта нас интересуют высокие значения  $P(t) = P_0$ , т.е.  $P_0 \rightarrow 1$ .

Тогда влияние параметров  $\alpha$  и  $\theta$  на  $P(t)$  и  $t(P_0)$  выглядит так, как представлено на рисунке 7.5.

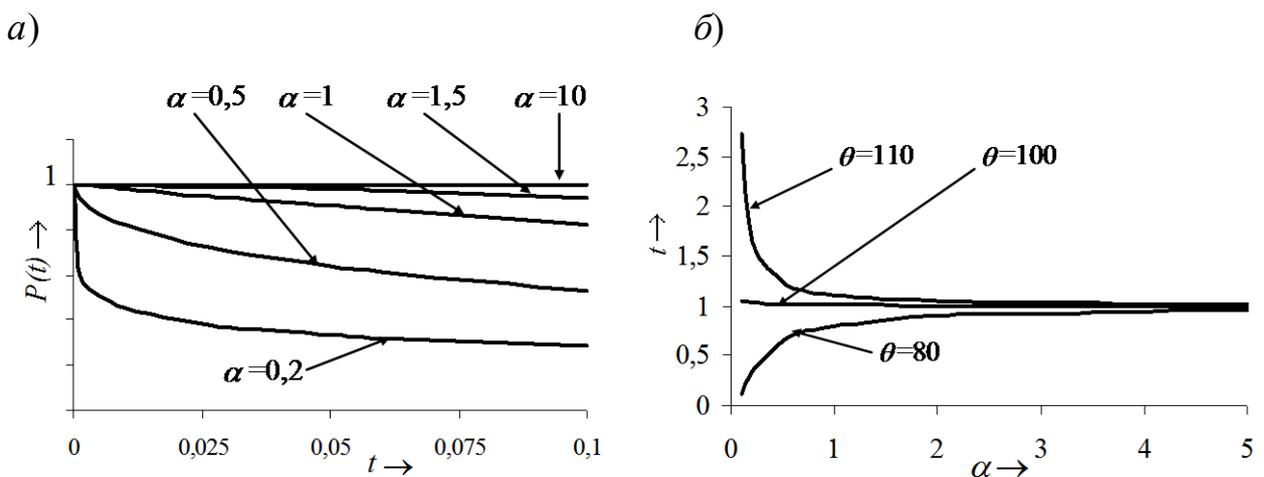


Рисунок 7.5 – Влияние параметра  $\alpha$  на зависимость вероятности безотказной работы объекта от  $t$  при фиксированном параметре  $\theta = 0,5$  (а) и изменение  $t$  при фиксированной  $P_0 = 0,99$  в зависимости от изменения параметров  $\alpha$  и  $\theta$  (б)

Как видно из семейства графиков на рисунке 7.5, *a*, увеличение параметра  $\alpha$  приводит к уменьшению вероятности безотказной работы. Но, с другой стороны, по рисунку 7.5, *б*, сказывается влияние связанного с ним параметра  $\theta$ . При определенных соотношениях  $\alpha$  и  $\theta$  такой подход к решению задачи приводит к тому, что время безотказной работы при заданной вероятности ведет себя неоднозначно. Граничные условия этой неоднозначности связаны с формой представления зависимости по формуле (7.5) – рисунок 7.6. При попадании в верхнюю область соотношений  $P_0-\theta$ , ограниченную  $P_0=1$  и граничной кривой, зависимость  $t(\alpha)$  будет качественно выглядеть аналогично той, у которой  $\theta = 80$ . При попадании соотношений  $P_0-\theta$  на границу кривой или ниже ее качественная зависимость  $t(\alpha)$  аналогична той, у которой  $\theta = 110$ .

Полученные данные можно интерпретировать следующим образом. Параметр  $t$  несет в себе смысл числа циклов нагружения, в граничном состоянии, когда  $t \rightarrow 1$ , т.е. численные значения параметров  $P_0$  и  $\theta$  находятся на кривой рисунка 7.6,  $t$  соответствует одному циклу нагружения до разрушения со значением вероятности  $1-P_0$ . При уходе численных значений параметров  $P_0$  и  $\theta$  в область выше кривой – для разрушения требуется менее одного полного цикла, можно говорить о нагрузке, соответствующей полученному  $t$  в доле эквиваленте к полной величине нагрузки цикла, опять же с вероятностью  $1-P_0$ .

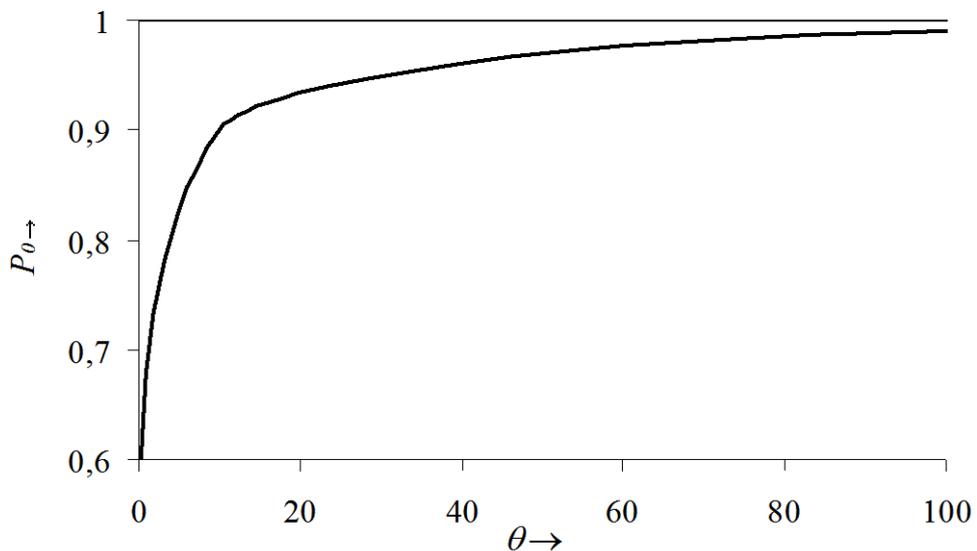


Рисунок 7.6 – Кривая граничных условий соотношений  $P_0-\theta$

Еще отметим, что при малых значениях параметра  $\alpha \rightarrow 0$  и численных значениях параметров  $P_0$  и  $\theta$  в области выше кривой – время безотказной работы стремится к 0, т.е. разрушение неизбежно при малейших нагрузках в предлагаемой интерпретации. А при численных значениях параметров  $P_0$  и  $\theta$  в области ниже кривой – время безотказной работы или количество циклов до разрушения наоборот  $t \rightarrow \infty$ . Кроме того, существенное увеличение параметра  $\alpha$  приводит к приближению к ситуации с одним полным циклом нагружения до разрушения, т.е. напряженное состояние  $\sigma$  при максимальной нагрузке цикла в месте разрушения стремится к  $\sigma_{кр}$  – критическому значению напряжений. Качественно связь параметра  $\alpha$  с  $\sigma$  представлена на рисунке 7.7. Указанное обстоятельство напряжения в сечении разрушения объекта от вероятности разрушения физически характеризует смещение значения напряжения к значениям ниже среднего при  $P_0 < 0,5$ , и повышение этой величины при  $P_0 > 0,5$ .

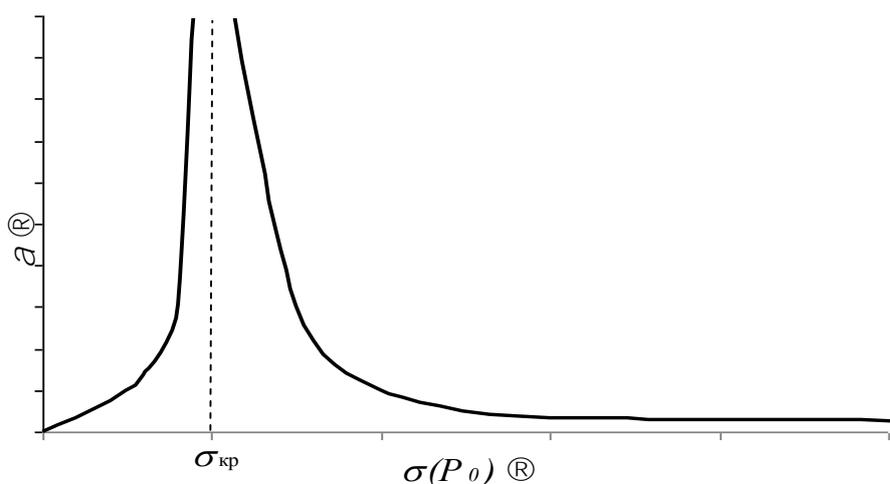


Рисунок 7.7 – Качественная зависимость параметра  $\alpha$  распределения Вейбулла от напряженного состояния материала в месте разрушения  $\sigma$  с учетом вероятности разрушения

Определить величину  $\sigma_{кр}$  для каждой конкретной вероятности можно, используя расчеты в соответствии с нормальным распределением этой величины, которое используется [215] для статистической оценки разбросов значений прочностных характеристик материалов, если принять  $\sigma_{кр} = \sigma_{в}$ , но физически такое приравнивание необоснованно в силу вероятностного принципа, положенного в

основу рассуждений. Это связано с тем, что предел прочности  $\sigma_v$  относится к каждому конкретному объекту и имеет определенное значение, в то время как  $\sigma_{кр}$  характеризует напряжение разрушения с определенной вероятностью, т.е. в материале подразумеваются процессы деградации структуры, ведущие к разрушению, но не однозначно его определяющие. Такое объяснение допустимо потому, что концепция вероятностного подхода вносит неопределенность, которая вызвана внешними дополнительными факторами, в результате которых разрушение может не произойти (например, изменение температуры объекта в ходе испытаний, а если использовать параметры акустической эмиссии, возникающей при механическом нагружении, то неопределенность добавляется собственно наличием испытательного нагружения, вносящего свои необратимые изменения).

Проведем поверхностный анализ полученной качественной зависимости  $\alpha(\sigma)$ :

- очевидно, что зависимость выходит из точки 0, так как  $\alpha = 0$ , вероятность безотказной работы перестает зависеть от времени в соответствии с формулой (7.5), что возможно только в случае снижения нагрузки также до 0;
- форма кривой меняется в зависимости от других параметров распределения Вейбулла и должна быть несимметричной, что видно из расчетов, представленных на рисунке 7.5, а;
- повышение значений параметра  $\alpha$  приводит к однозначному приближению напряженного состояния материала в месте разрушения к критическому значению напряжений;
- реальное рабочее состояние материала ограничивается значениями напряжений, достаточно немного превышающими  $\sigma_{кр}$ , не более чем в 2–3 раза в предельных состояниях материал а при разрушении.

Таким образом, отыскание некоего, по всей видимости, интегрального параметра, определенного по результатам диагностики объекта одним или несколькими методами, поведение которого по отношению к напряженному состоянию объекта в месте предстоящего разрушения и качественно соответствующего опи-

санним изменениям параметра  $\alpha$  распределения Вейбулла поможет частично решить поставленную задачу.

Теперь рассмотрим в рамках предлагаемой модели закономерности изменения параметра  $\theta$ . Для этого примем фиксированную вероятность безотказной работы  $P(t) = \text{const}$  и будем рассматривать поведение параметра  $\theta$  в зависимости от изменений параметров  $t$  и  $\alpha$ . Для удобства восприятия информации перейдем от времени безотказной работы к количеству циклов  $N_p$  до разрушения.

Тогда расчетные данные, изменения параметра  $\theta$  от  $N_p$  в логарифмическом масштабе по обеим координатам будут выглядеть в соответствии с рисунком 7.8.

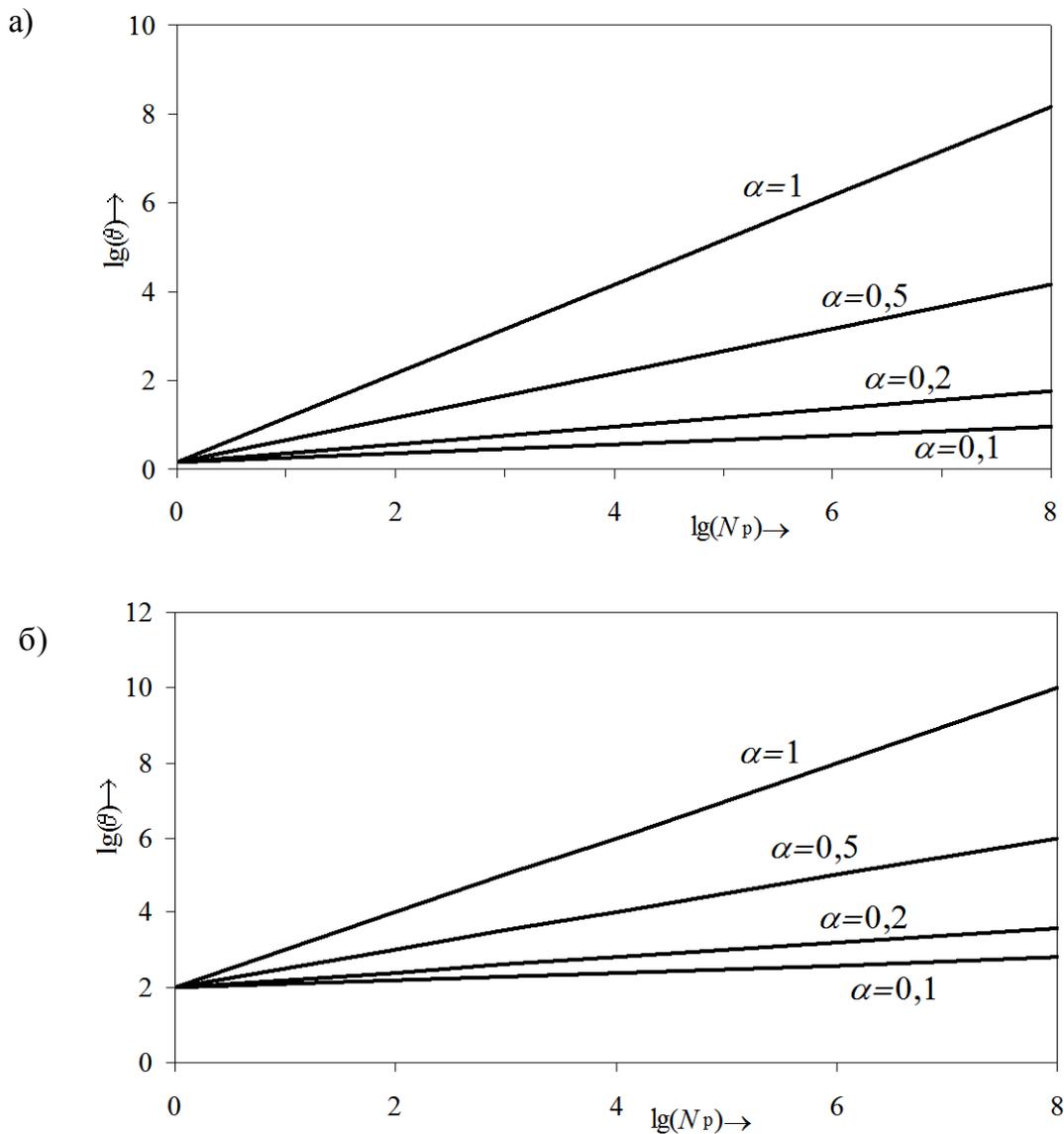


Рисунок 7.8 – Зависимость параметра  $\theta$  от числа циклов нагружения  $N_p$  до разрушения с вероятностью  $P(t) = 0,5$  (а) и  $P(t) = 0,99$  (б) при различных значениях коэффициента  $\alpha$

Приведенные данные показывают, что повышение вероятности безотказной работы при прочих равных параметрах приводит к увеличению коэффициента  $\theta$ . То же самое показывает зависимость от числа циклов до разрушения  $N_p$  при одинаковой вероятности. Это говорит о том, что параметр  $\theta$  снижается при приближении к критически напряженному состоянию объекта в ходе испытаний. Причем снижение происходит как в области, приближенной к критическому значению напряжений, что характеризуется его понижением при уменьшении вероятности объекта остаться неразрушенным из рисунка 7.6. То есть на всем протяжении изменений напряженного состояния в месте предстоящего разрушения численные значения параметра  $\theta$  уменьшаются.

Кроме того, исходя из рисунка 7.6, можно определиться с крайними значениями этого параметра, так как в момент разрушения  $\theta \rightarrow 0$ , а при невозможности, когда  $P(t) = 1$ ,  $\theta \rightarrow \infty$ . Тогда можно предположить зависимость  $\theta(\sigma)$  как обратную, причем выраженную в экспоненциальной или степенной форме.

Таким образом, параметр  $\theta$  в данной модели отождествляется с некоторым интегральным параметром, полученным при неразрушающем контроле объекта, связанным с напряжением в рабочем состоянии объекта в локальном участке разрушения обратной сложной зависимостью, так как, выражая  $\theta$  из формулы (7.7), получаем:

$$\theta = - \frac{t^\alpha}{\ln(P(t))}. \quad (7.10)$$

Далее следует оценить устанавливаемую вероятность безотказной работы  $P_c$ . От ее значения во многом зависит экономическая эффективность данной методики оценки ресурса. Прямое назначение достаточно высокого значения такой вероятности приведет к неизбежной высокой доле перебраковки диагностируемых объектов. Это связано с тем, что по предлагаемой модели с полученными в ходе диагностики коэффициентами распределения  $\alpha$  и  $\theta$  будет определяться время безотказной работы с высокой вероятностью, например, 0,9999. Тогда назначая рассчитанное время безотказной работы, получим один отказ (разрушение) на

10 000 результатов. Но если это время достаточно большое, то вмешиваются дополнительные факторы, которые могут снизить ресурс объекта (например, форс-мажорные перегрузки, возможные износы участков трения и т. д.). С другой стороны, рассчитывая относительно небольшое значение времени безотказной работы (например, равную половине или 0,75 от максимально возможного времени до следующей диагностики, определенную в силу обстоятельств, указанных выше), получаем при этом чрезвычайно низкую вероятность разрушения, т.е. получаем перебраковку достаточно большого объема проконтролированных объектов.

Поэтому целесообразно оценивать ресурс объекта в плоском поле  $P_c-N$  или  $P_c-t$ , если принять  $t = f_n \cdot N$ , где  $f_n$  – средняя частота изменения колебательной нагрузки. Для ряда технических объектов с большим разбросом частоты для разных объектов можно использовать предельно возможное значение частоты  $f_{кр}$ , но тогда можно существенно скорректировать значения допустимых вероятностей безотказной работы в сторону уменьшения в зависимости от вероятности зарождения дефекта и скорости его развития для каждого участка данного объекта.

Для объектов с фиксированными возможными значениями времени безотказной работы или ресурса (объекты с таким принципом нормирования интервалов междиagnostического периода наиболее широко распространены среди технических объектов) конечным итогом расчетов может быть номограмма в координатах  $\alpha-\theta-P_c$  с определенными областями междиagnostических периодов эксплуатации.

Наиболее перспективным в плане достаточно оперативного и достоверного поиска локальных областей деградации структуры и оценки их состояния является АЭ метод [4, 286], совмещенный с методами, позволяющими проводить дефектомерию.

### **7.3. Экспериментальные исследования характеристик сигналов акустической эмиссии как элементов вероятностной модели оценки параметров ресурса объектов контроля**

Вероятностная оценка остаточного ресурса является достаточно корректной, учитывая сильную неоднородность структуры металла, отраженную в работах [233, 272], приводящую в разные моменты к ускорению или замедлению развития трещин.

Проведенный анализ вероятностной модели оценки ресурса для практического применения требует связать критерии  $\alpha$  и  $\theta$  с измеряемыми характеристиками метода НК, который применяется для диагностирования. В нашем случае необходимы эмпирические исследования, которые позволят использовать характеристики сигналов АЭ для оценки ресурса с заданной вероятностью безотказной работы.

Прежде всего необходимо определиться с задаваемой вероятностью безотказной работы  $P(N)$ . Для литых деталей тележки этот параметр должен быть большим, как минимум, сравнимым с долей исправных деталей, отработавших полный период между ремонтами. Согласно статистике выход деталей с дефектами, обнаруживаемыми в процессе эксплуатации и подтвержденными инструментальными методами, составляет около 0,0005 от общего числа. Таким образом, задаваемый для расчетов уровень вероятности безотказной работы можно принять равным 0,9995.

Проведенный в разделе 7.2 (см. рисунок 7.7) анализ параметра  $\alpha$  показывает, что его поведение качественно коррелирует с поведением коэффициента взаимной корреляции сигналов АЭ, приходящих из области развивающегося источника [227, 272]. Объясняется это тем, что на начальной стадии развития дефекта единичные микроразрушения, являющиеся источниками актов АЭ, различны по величине, изменению направления поля напряжений. Кроме того, в факт разру-

шения вносят существенный вклад случайные особенности структурного состояния, такие как направление кристаллической решетки относительно направления разрушающих усилий и т. п. При достижении критических напряжений параметр  $\alpha$  резко возрастает. При формировании и продвижении магистральной трещины коэффициент корреляции также резко увеличивается, что видно из исследований, приведенных в работах [226, 227]. После того как трещина начинает развиваться ускоренно, ее скачки настолько велики, а механизмы разрушения разнообразны, что коэффициент корреляции между сигналами, принятыми в этот период, уменьшается. Исходя из эмпирического сходства поведения параметра вероятностной модели  $\alpha$  и суммарного коэффициента корреляции сигналов АЭ, будем использовать последний для описания параметра  $\alpha$ .

Кроме того, следует отметить, что использование формулы (7.7) с физической точки зрения требует использования только безразмерных величин, поэтому ее следует представить как оценку числа циклов нагружения  $n$ :

$$n = \sqrt[3]{-\theta \cdot \ln(P_0)} . \quad (7.11)$$

Для установления экспериментальной связи между этими параметрами были проведены эксперименты по статическому нагружению образцов с концентраторами до разрушения. Вид нагрузки – одноосное растяжение. При этом было проведено два эксперимента: в одном случае это было классическое одноосное растяжение, во втором – растяжение со смещенной осью растяжения, как показано на рисунке 7.9, что позволило создать в вершине концентратора распределение напряжений, близкое к тем, которые возникают при изгибе.

Использование обоих экспериментов необходимо потому, что разные участки литых деталей тележек как в процессе АЭ контроля, так и эксплуатации испытывают различные типы механической нагрузки и основными из них являются растяжение и изгиб. Учитывая, что перераспределение напряжений в нагружаемом сечении при растяжении и изгибе разное, необходимо два эксперимента для того, чтобы определить влияние каждого вида нагружения на характеристики АЭ.

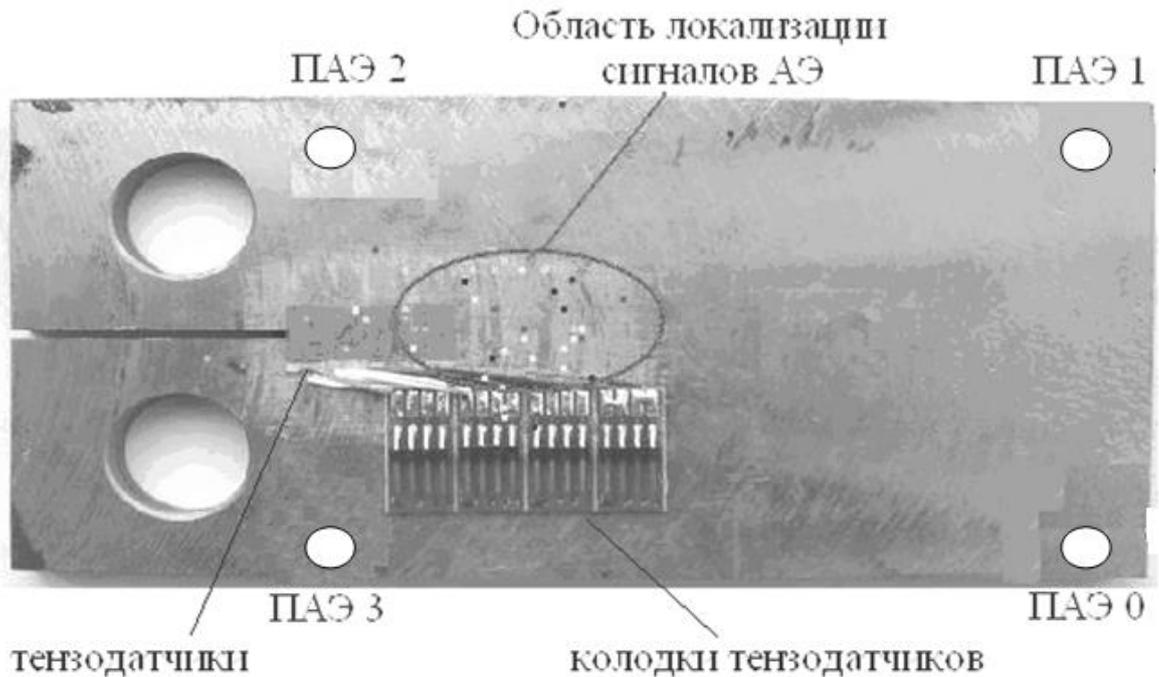


Рисунок 7.9 – Образец для испытаний с приложением изгибных нагрузок с наклеенными тензодатчиками

На первом этапе провели исследования связи параметров АЭ с характеристиками  $\alpha$  и  $\theta$ .

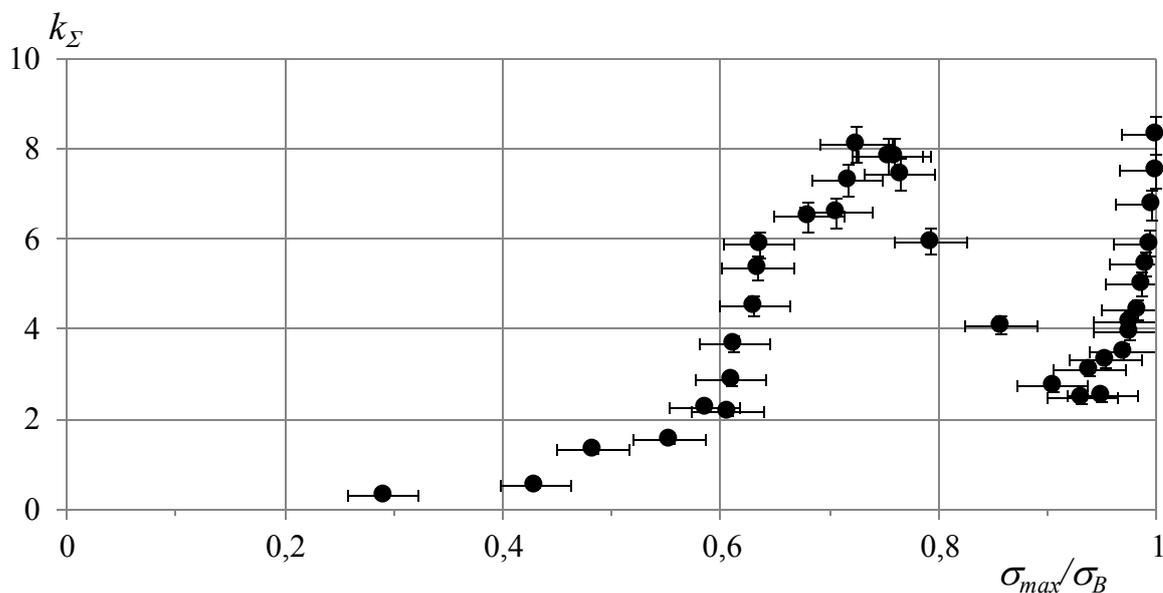
При анализе использовали данные сигналов АЭ, которые были получены в интервале усилия нагружения  $0,8 \dots 1F$ , т.е. в интервале нагрузок, исключая влияние, связанное с эффектом Кайзера в процессе реальных испытаний контролируемых объектов. Чувствительность каналов была на уровне -56 дБ от среднего уровня сигналов, возбуждаемых в образце имитатором Су-Нильсена твердостью 2Н на расстоянии 80 мм.

На этапе обработки информации получили коэффициенты корреляции по формуле (4.6) для всех сигналов, идентифицированных от источника аналитическим способом расчета координат [8, 15]. Полученные результаты представлены на рисунке 7.10, а в виде зависимости  $k_{\Sigma}$  – суммарного коэффициента корреляции сигналов  $i$  и  $j = i + 1$ , попадающих в диапазон нагрузок  $0,8 \dots 1$  к максимальной  $\sigma_{\max}$  от величины относительной к пределу прочности максимальной испытательной нагрузки. Кроме того, на рисунке 7.10, б приведена зависимость  $k_{\text{cp}}$  – среднего коэффициента корреляции сигналов  $i$  и  $j = i + 1$ , попадающих в диапазон

нагрузок  $0,8...1$  к максимальной  $\sigma_{max}$ , от величины относительной к пределу прочности максимальной испытательной нагрузки.

Приведенные на рисунке 7.10 зависимости представлены для образца № 3, но они примерно одинаковы для всех исследованных образцов за исключением образца № 5, для которого порог чувствительности был снижен на 12 дБ, что сказалось на потере АЭ информации.

a)



b)

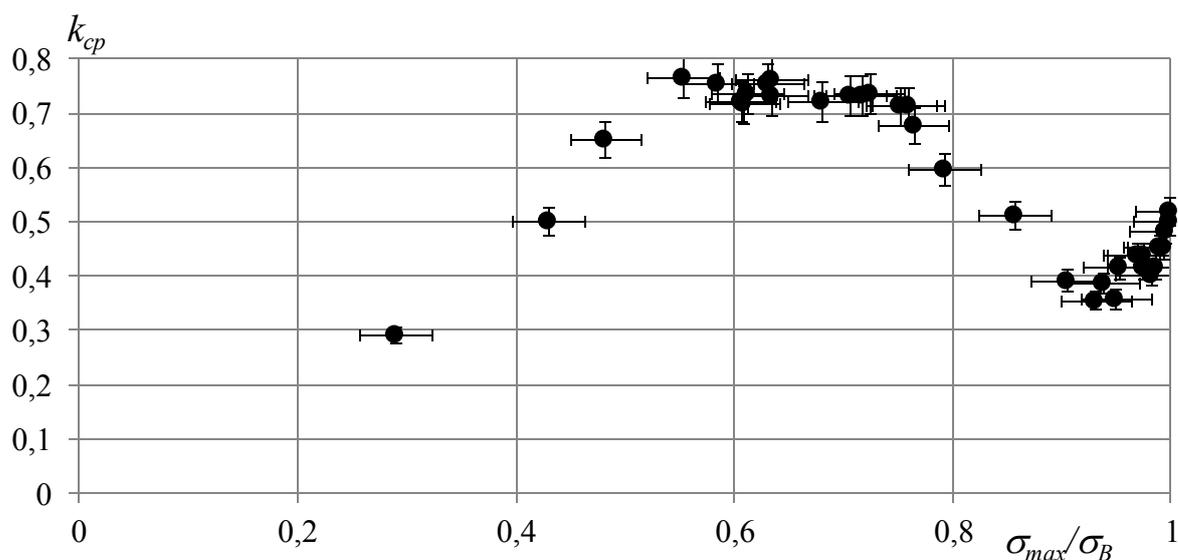


Рисунок 7.10 – Зависимость корреляционных параметров  $k_{\Sigma}$  (a) и  $k_{cp}$  (б) от относительного напряжения разрушения растягивающего напряжения в области концентратора

Общее число зарегистрированных от источника – концентратора сигналов АЭ за все время статического нагружения в образце № 5 было 15, в то время как для всех остальных не менее 36. Поэтому данные образца № 5 не использовали для определения параметра  $\alpha$  данной вероятностной модели.

Приведенные на рисунке 7.10 результаты показывают, что наименьшую устойчивость корреляционные параметры имеют при малых относительных напряжениях, ниже предела выносливости. В первую очередь это связано с малым количеством сигналов АЭ на этом этапе. Однако следует учитывать, что образцы имели толщину 6 и 8 мм. Это обстоятельство сильно ограничивает объем деформируемого в вершине концентратора металла. Для реальных деталей минимальная толщина стенки с потенциальным концентратором, как минимум, в два раза больше, а для таких зон, как углы буксовых проемов или нижний пояс надрессорной балки (наиболее потенциально опасные участки) толщина в области концентраторов будет больше на порядок. Это позволит получить достаточное количество сигналов АЭ, обработка которых даст более точные результаты для оценки состояния металла. Поэтому такой параметр, как  $k_{\Sigma}$  целесообразно делить на толщину  $d$  диагностируемого участка:

$$k_{\alpha} = \frac{k_{\Sigma}}{d}. \quad (7.12)$$

Параметр  $d$  допустимо использовать потому, что остальные параметры объема, испытывающего разрушение и излучающего вследствие этого сигналы АЭ, по сравнению с ним пренебрежимо малы как для образцов, так и для реальных объектов испытаний.

После этой обработки используем только часть данных и представим результаты расчетов параметра  $k_{\alpha}$  в зависимости от относительного напряжения на рисунке 7.11 в диапазоне максимальных напряжений до  $\sigma_{0,2}$ . В данном виде зависимость суммарного приведенного коэффициента взаимной корреляции сигналов излучаемых источником  $k_{\alpha}$  от максимальной нагрузки испытаний наиболее точно можно описать в виде экспоненциальной зависимости вида:

$$k_{\alpha} = 0,0025 \cdot e^{8,3 \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma_B} \right)}. \quad (7.13)$$

Данная зависимость, представленная непрерывной кривой на рисунке 7.11, имеет коэффициент корреляции 0,972 с экспериментальными результатами. Тогда эту характеристику можно использовать в качестве параметра  $\alpha$  при расчете ресурса в по формуле (7.9).

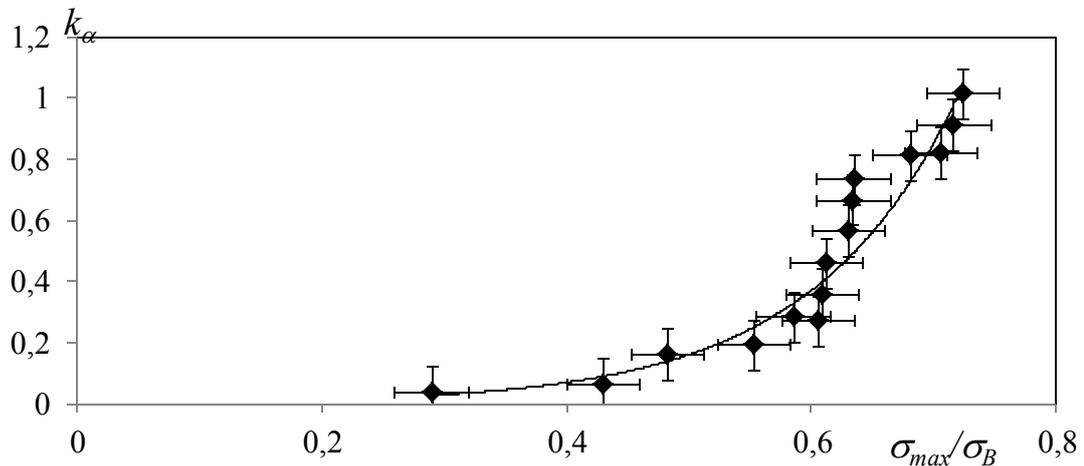


Рисунок 7.11 – Зависимость суммарного приведенного коэффициента взаимной корреляции сигналов, излучаемых источником  $k_\alpha$ , от максимальной нагрузки испытаний при растяжении

Приведенная формула (7.13) приближенно описывает поведение параметра  $\alpha$  в интервале докритического напряжения в окрестности развивающегося дефекта, критическое значение соответствует пределу текучести. Кроме того, параметр  $\alpha$  в докритической области изменяется в пределах  $0 \dots 1$ , и по его значению можно определить соответствующее значение относительного напряжения. Однако, оценка таким образом напряженного состояния еще не позволяет определить скорость развития трещины, хотя, зная местоположение источника, его первоначальную толщину, максимальное испытательное напряжение при отсутствии дефектов, можно сделать определенные приближенные расчеты о размерах источника АЭ.

На втором этапе провели эксперименты, создающие изгибные напряжения на участке с концентратором, как указано на рисунке 7.19. Кроме того, в эксперименте были задействованы образцы с разной толщиной (от 9 до 12 мм), что позволяет при одной и той же нагрузке получить разное напряженное состояние в

вершине концентратора. Такая модель формирования напряжений в вершинах предполагаемых концентраторов характерна для большинства участков боковых рам и надрессорных балок в процессе восприятия эксплуатационных нагрузок. Поэтому для такого вида образцов сложно оценить напряжения, которые распределены неравномерно, и целесообразно перейти к определению коэффициента интенсивности напряжений (КИН). В монографиях [214, 289] изложены принципы оценки КИН, из которых наиболее подходящая формула для расчета КИН при растягивающих напряжениях:

$$K_1 = Y_1 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (7.14)$$

где  $\sigma$  – растягивающее напряжение как отношение нагрузки к площади сечения;  $l$  – длина трещины;  $Y_1$  – эмпирический коэффициент, определяемый по формуле

$$Y_1 = 1,12 - 0,23\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30,39\lambda^4, \quad (7.15)$$

где  $\lambda$  – отношение длины трещины к толщине образца. При изгибных напряжениях КИН определяется по формуле 7.3, а коэффициент  $Y_1$  определяется по формуле:

$$Y_1 = 6,53 - 10,39\lambda + 49,19\lambda^2 - 84,97\lambda^3 + 87,34\lambda^4. \quad (7.16)$$

Логично предположить, что при изгибных нагрузках концентрация напряжений в вершине значительно сильнее, чем при растяжении, следовательно, развитие трещины будет более интенсивным, т.е. и коэффициент  $\alpha$  также будет расти быстрее. На рисунке 7.12 приведены результаты экспериментальной зависимости параметра  $\alpha$ , когда его значение определяли по формуле (7.12), от числа циклов, оставшихся до разрушения. Результаты эксперимента были получены при проведении циклических испытаний образцов, представленных на рисунке 7.9, с периодическим проведением статического нагружения с нагрузкой, превышающей циклическую в 1,25 раза. Испытания проводили до полного разрушения. При этом использовали образцы с разной толщиной (от 9 до 12 мм), что позволяло увидеть, насколько вовлекаемый в процесс разрушения объем влияет на получаемые параметры.

Приведенные на рисунке 7.12 данные, показывают, во-первых, что по сравнению с простым растяжением параметр  $k_\alpha$  действительно достигает более высо-

ких значений по мере развития трещины к финальному разрушению. Во-вторых, видно, что увеличение толщины образцов, а значит и участвующего в активном деградиационном процессе объема, сопровождается увеличением параметра  $k_\alpha$ .

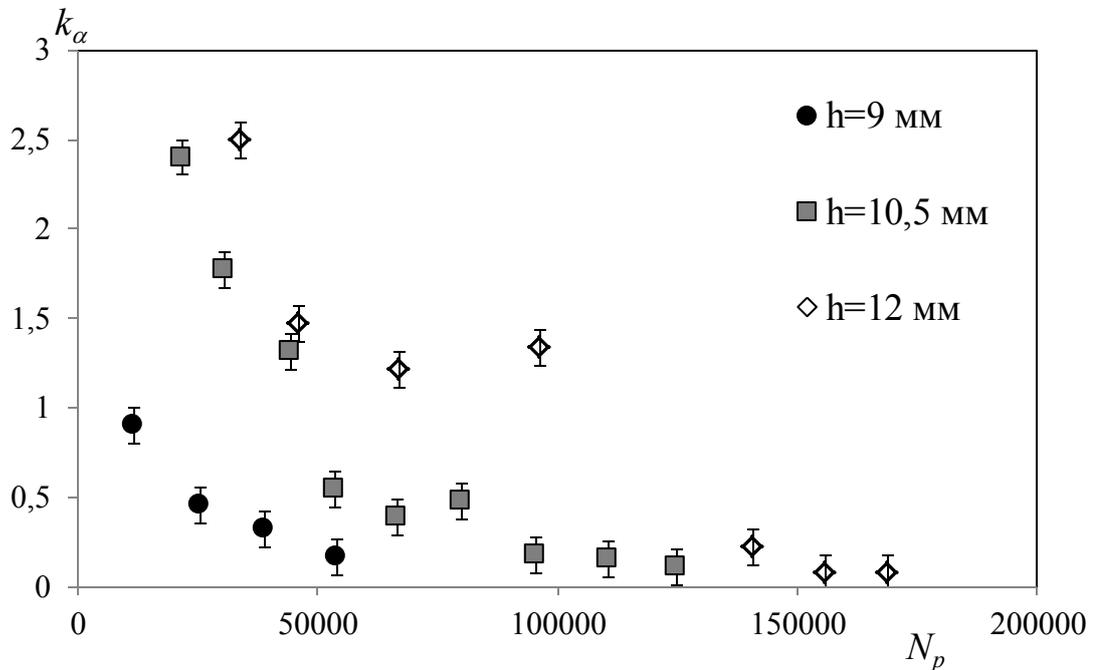


Рисунок 7.12 – Связь параметра  $k_\alpha$  с оставшимся до разрушения числом циклов  $N_p$  для образцов с различной толщиной  $h$

Однако данные практически со всех образцов показывают периодические отклонения связи этих параметров от плавной кривой, что говорит о неоднородности структурного состояния металла, вследствие наличия литейных дефектов структуры или в виде несплошностей. Именно поэтому оценка состояния материала должна носить вероятностный характер.

Для получения законченной методики вероятностной оценки состояния металла на следующем этапе исследований необходимо определить связь параметра  $\theta$  с характеристиками АЭ разрушающегося материала. Анализ формулы (7.11) показывает, что для одной и той же вероятности разрушения и заданного числа циклов до разрушения повышение параметра  $\alpha$  сопровождается увеличением и параметра  $\theta$ . То есть повышение суммарного коэффициента корреляции источника неизбежно влечет снижение числа циклов, оставшихся до

разрушения, однако если параметр  $\theta$  становится больше, то этого не происходит. Такая ситуация с точки зрения материаловедения возможна, если коэффициент  $\theta$  отражает масштаб происходящих разрушений, например, связан с величиной зерна металла, которая, как известно [290, 291], влияет на скорость развития трещин. Поэтому для определения численных значений параметра  $\theta$  для низколегированной стали, из которой изготавливают литые детали тележки грузовых вагонов, провели обработку экспериментальных данных нагружения образцов статической нагрузкой, превышающей рабочую на 25 %. После статических испытаний повторяли циклические до разрушения. Под рабочей нагрузкой принимали циклическую нагрузку образца с концентратором различной длительности, что приводило к разным стадиям развития трещины. На рисунке 7.13 приведен график связи параметра  $\theta$  с суммарной энергией сигналов АЭ –  $E_{\Sigma}$  с учетом изменяющегося параметра  $k_{\alpha}$  и заложенной вероятностью числа циклов до разрушения 0,95. Параметр  $\theta$  вычисляли по формуле (7.11).

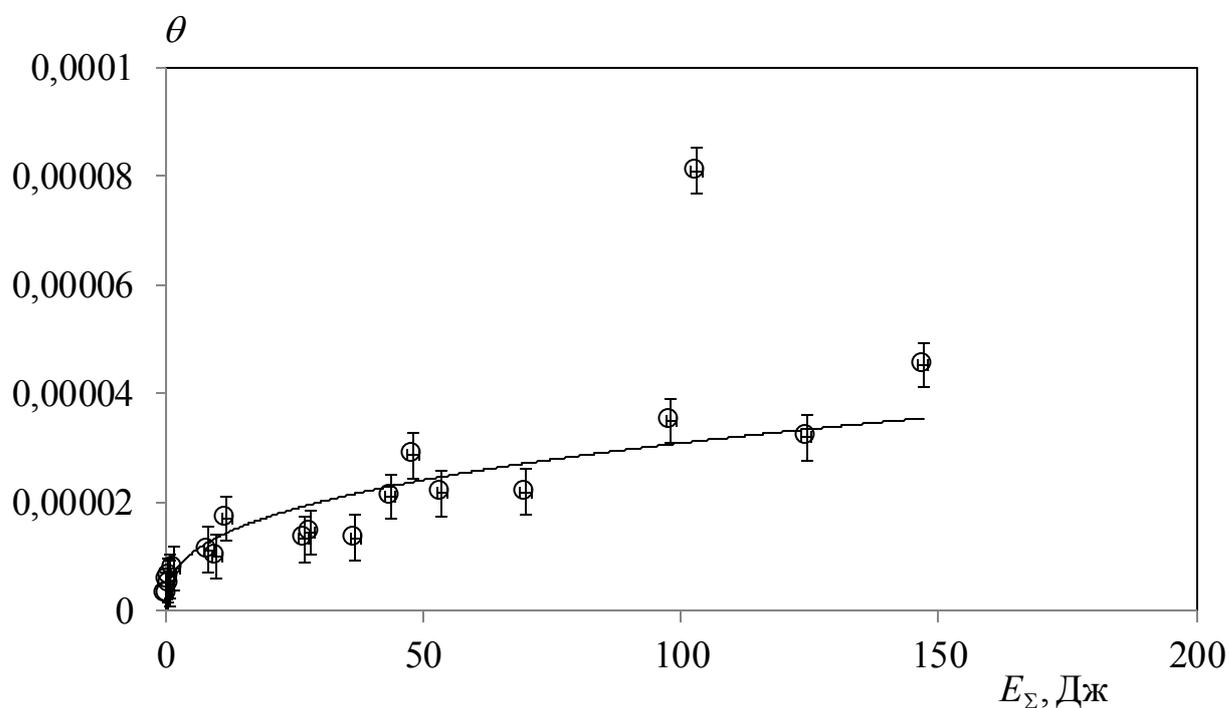


Рисунок 7.13 – Связь параметра  $\theta$  с  $E_{\Sigma}$  сигналов АЭ для образцов с толщиной 9,5–12 мм

Полученная связь параметра  $\theta$  с  $E_{\Sigma}$  с наибольшей корреляцией (с коэффициентом 0,871) обладает степенной зависимостью с показателем степени, равным

2,88. Очевидно, что значение показателя степени такой зависимости может отклоняться и является чувствительным к структурному состоянию. Такой показатель степени соотносится с показателем степени зависимости суммарной энергии сигналов АЭ от величины напряженного состояния области концентратора, описанного в работах [227, 228]. С практической точки зрения параметр  $\theta$  можно вынести из под корня формулы (7.9) таким образом, что вместо него будет фигурировать новый параметр:

$$\lambda = \sqrt[\alpha]{\theta}. \quad (7.17)$$

Практическая реализация такого способа оценки остаточного числа циклов до разрушения описана в работах [292–294] и заключается в том, что на предварительной стадии из материала, из которого изготовлен объект диагностики, изготавливают не менее пяти плоских образцов для механических испытаний и проводят измерения параметров АЭ при их растяжении до разрушения. Из полученных результатов определяют корреляционную экспоненциальную зависимость суммарной энергии излучения источника от относительной величины нагрузки как экспоненциальную или степенную зависимость с учетом величины относительной нагрузки во время прихода сигналов АЭ.

Для обеспечения минимального потока шумовых сигналов, связанных с взаимодействием объекта испытаний с нагружающим устройством и другими побочными факторами, нагружение проводится в три стадии. На первой стадии проводится нагружение до значения половины испытательной нагрузки. Затем определяется общая активность источников акустической эмиссии со всех диагностируемых участков объекта и для последующих нагружений задается скорость подачи нагрузки по формуле:

$$\frac{F}{t} = \frac{F_1}{50 \cdot N}, \quad (7.18)$$

где  $F_1$  – величина нагрузки первого этапа,  $\dot{N}$  – средняя активность сигналов акустической эмиссии, полученная со всего объекта за время этого этапа.

Затем проводят второй этап нагружения до нагрузки на 10...15% превышающей рабочую, и записывают сигналы, регистрируемые приемными преобразователями. На последнем этапе объект нагружают до максимальной испытательной нагрузки с регистрацией сигналов акустической эмиссии приемными преобразователями.

После этого производится расчет остаточного ресурса с использованием корреляционных зависимостей сигналов акустической эмиссии по формуле

$$N = \lambda \cdot \sqrt[\alpha]{-\ln(1 - P)}, \quad (7.19)$$

где  $\lambda$  – энергетический коэффициент, учитывающий суммарную энергию сигналов АЭ и определяемый по формуле

$$\lambda = K_{ин} \cdot E_{\Sigma}, \quad (7.20)$$

коэффициент  $K_{ин}$  учитывает относительную величину напряженного состояния детали в области оцениваемого источника. Коэффициент  $K_{ин}$  необходим для коррекции параметра  $\lambda$ , так как напряженное состояние области источника зависит от объема материала, испытывающего необратимые изменения.

Использование этой методики требует достаточно серьезных предварительных работ по определению коэффициентов, используемых для оценки. Но так как литые детали тележек – детали массового производства, то применение этого способа в целом оправдано.

Безусловно, полученная эмпирическая модель имеет существенные ограничения, связанные с сильной структурной неоднородностью литых деталей как на микро-, так и на макроуровне. Однако эмпирический характер исследований, слабо подкрепленный надежной физической моделью, является не только недостатком, но и весьма оправданным для оценки состояния деталей с вероятностной точки зрения. Проведенные исследования с испытанием пяти и более образцов позволяет в первом приближении дать оценку состояния металла, а последующие исследования и накопление статистического материала должны привести к хорошим и достаточно надежным результатам.

#### 7.4. Анализ применения вероятностного способа оценки ресурса для литых деталей тележек грузовых вагонов

Для использования предлагаемой в предыдущем разделе методики диагностирования остаточного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов, необходимо установить задаваемые вероятностной моделью параметры. С учетом влияния относительной нагрузки испытаний и для снижения влияния ложных источников АЭ в соответствии с исследованиями, представленными в работах [260, 263], сначала используем расчеты напряженного состояния литых деталей, приведенные во второй главе. Для ранжирования участков детали по степени опасности, так как, имея на различных участках разные максимальные циклические рабочие напряжения для каждого из них, источник с одинаковыми параметрами АЭ будет развиваться до разрушения разное число циклов. Например, для боковой рамы можно использовать расчетную модель напряжений, полученную при моделировании напряжений во второй главе. На рисунке 7.17 показано распределение напряжений на участке боковой рамы под воздействием эксплуатационных нагрузок, которую можно использовать как карту участков детали по степени опасности. Аналогичную карту участков по степени долговечности можно представить и для надрессорной балки.

Литые детали тележки в ходе эксплуатации испытывают сложное напряженное состояние, и при вероятностной оценке их состояния сам метод закладывает отсутствие достоверной информации о состоянии объекта в ходе его диагностики. Аналогичный подход распространяется на оценки по прогнозированию. Заведомо устанавливаются некоторые средние параметры последующей эксплуатации. Поэтому для каждой показанной на рисунке 7.14 зоны контроля боковой рамы устанавливаем коэффициент  $K_{ин} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_p}$ , где  $\sigma_p$  – эксплуатационная нагрузка, соответствующая для каждой зоны, которая представлена на рисунке 2.3, с округлением до максимального значения в каждой зоне.

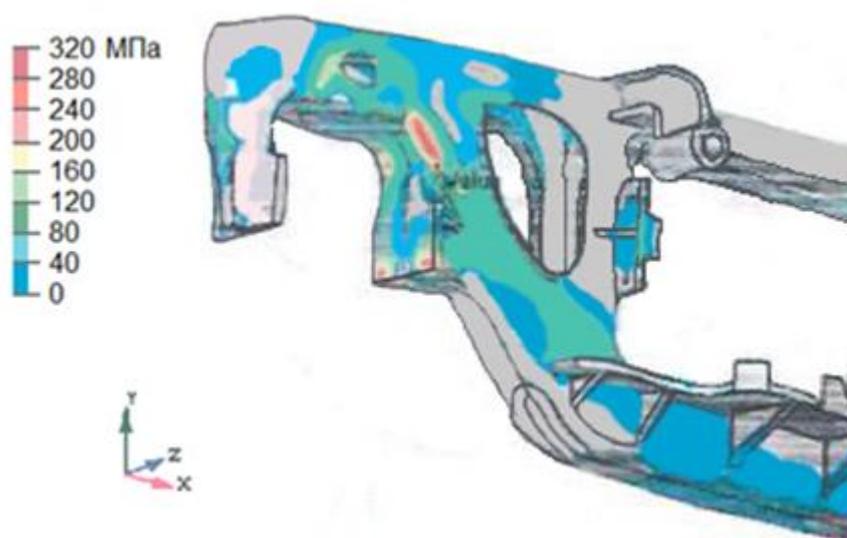


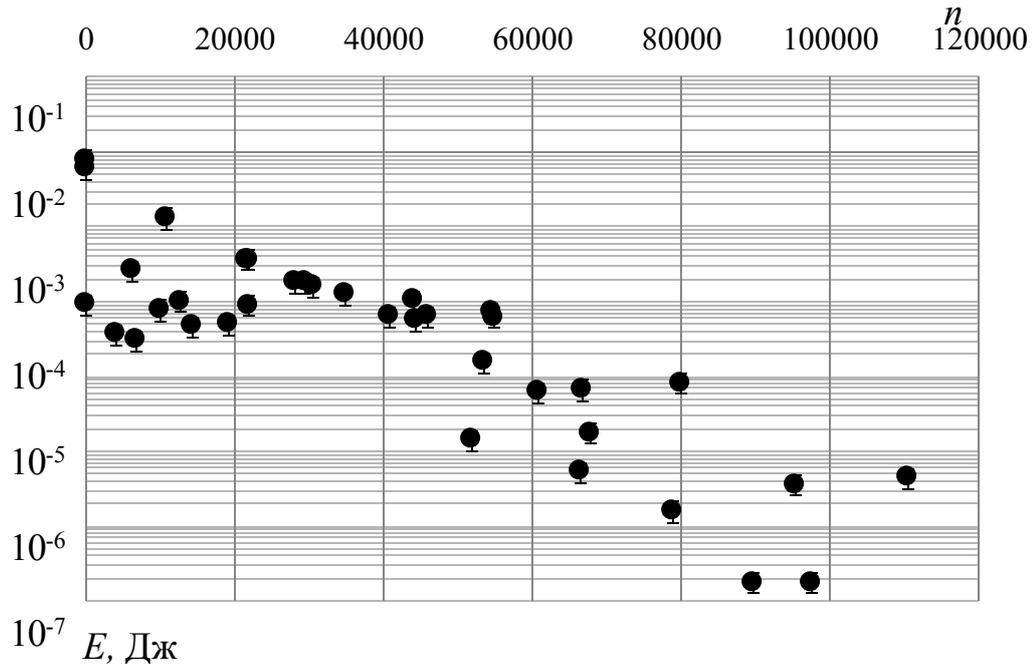
Рисунок 7.14 – Расчетное распределение максимальных растягивающих напряжений в боковой раме в процессе эксплуатации

При использовании для оценки состояния металла параметры АЭ, особенно такие как энергия сигналов, важно обеспечить чувствительность преобразователей, адекватную тем экспериментальным данным, на основе которых построены связи характеристик напряженного состояния контролируемого материала, и параметрам АЭ. Как показали эксперименты, с помощью имитаторов Су-Нильсена, используя аппаратные возможности диагностической АЭ системы и методические принципы построения оптимальных пьезоантенн, изложенные в работах [8, 15], в литых деталях можно добиться чувствительности, аналогичной той, которая была при испытаниях образцов. Поэтому для построения зависимости параметра  $\lambda$  от  $E_{\Sigma}$  воспользуемся результатами экспериментов на образцах.

Во-первых, рассмотрим связь  $E_{\Sigma}$  с КИН в вершине развивающегося концентратора при изгибе, рассчитанного по формуле (7.3), и числом, оставшимся до разрушения циклов для образцов с разной толщиной (от 9 до 12 мм). Эти данные представлены на рисунке 7.15.

Характерной особенностью полученных данных является то, что отсутствует влияние толщины образца на связь суммарной энергии сигналов АЭ как с оставшимся числом циклов до разрушения  $N_p$ , так и с КИН в вершине трещины.

a)



б)

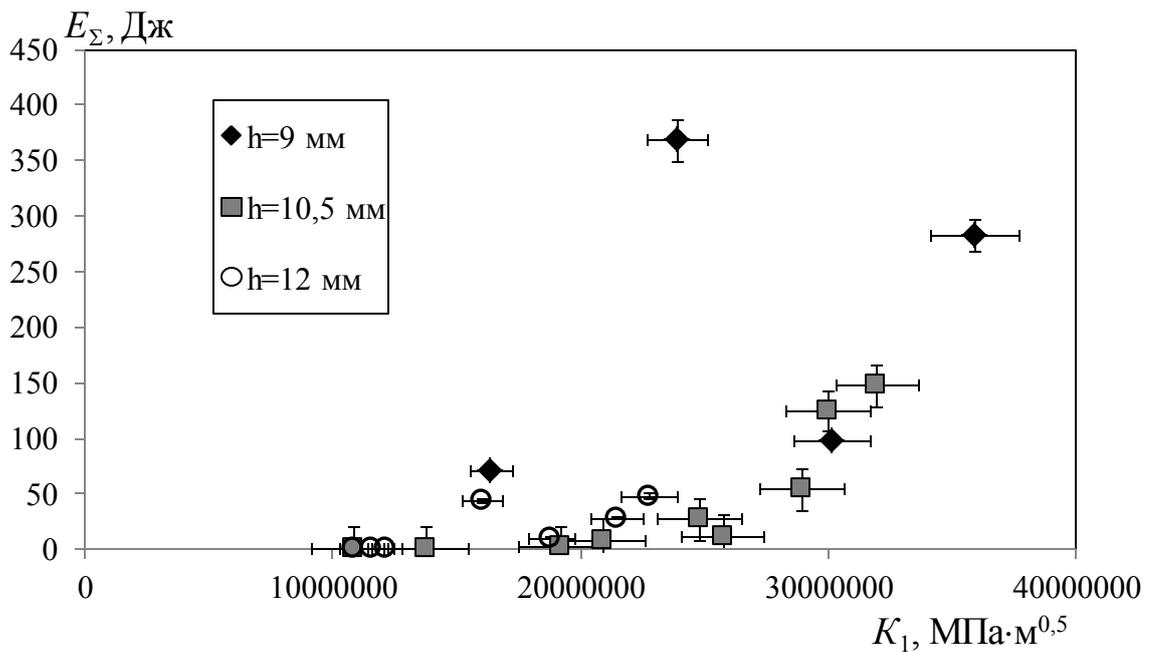


Рисунок 7.15 – Эмпирическая связь  $E_{\Sigma}$  сигналов АЭ от развивающейся трещины с  $N_p$  (а) и КИН (б)

Однако следует признать, что диапазон толщин образцов был достаточно мал и, возможно, не позволил заметить влияние этого размерного фактора. С другой стороны, этот диапазон близок к истинным толщинам стенок литых деталей тележек, для которых используется данная методика оценки ресурса, и в данном случае представленные зависимости пригодны для использования.

Из полученных зависимостей видно, что связь  $E_{\Sigma}$  с оставшимся числом циклов до разрушения имеет коэффициент корреляции 0,932 и принципиально сама может быть использована для определения ресурса материала в предлагаемых достаточно узких условиях для исследуемого материала. Однако полученные в лабораторных условиях данные подвергаются существенному наложению ложных сигналов, в том числе из области концентраторов.

При диагностировании таким способом реальных объектов доля ложных сигналов достаточно велика, что неоднократно наблюдается при испытаниях боковых рам и надрессорных балок с идентифицированными макроисточниками АЭ. Поэтому для методической фильтрации ложных сигналов, не связанных с развитием источника АЭ, целесообразно использовать зарекомендовавшие себя методики коррекции в виде дополнительного коэффициента нагрузки, отраженные в работах [261, 264, 295, 296], когда  $E_{\Sigma}$  каждого сигнала домножается на этот коэффициент, учитывающий относительную к максимальной нагрузке в момент регистрации сигнала аппаратурой.

Кроме того, применение параметра  $\alpha$  так же с весовым коэффициентом нагрузки позволяет частично отстраиваться от ложных сигналов АЭ при оценке состояния того или иного источника:

$$\alpha = k_{cp} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \left( k_{i,i+1} \cdot \frac{F_j}{F_{\max}} \right)}{m - 1}, \quad (7.21)$$

где  $k_{cp}$  – средний коэффициент корреляции между всеми сигналами источника;  $k_{i,i+1}$  – коэффициент корреляции между двумя соседними по времени прихода сигналами от источника;  $m$  – общее число сигналов от источника;  $F_j$  – нагрузка в момент регистрации аппаратурой сигнала  $j$ ;  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка за время испытания.

Еще из рисунка 7.15, б видно, что связь  $E_{\Sigma}$  сигналов АЭ с  $K_1$  более слабая и имеет значительно меньший коэффициент корреляции. Это объясняется расчетным характером параметра, который не учитывает реальные изменения КИН в вершине трещины, встречающей на своей пути различные дефекты структуры.

Полученные результаты применили к диагностированию состояния литых деталей с дефектами и без них. Кроме того, исследуемые детали имели незавершенный срок эксплуатации или выработанный назначенный нормативной документацией срок эксплуатации. Для проверки результатов контроля детали, признанные годными, были использованы по назначению в вагонах, курсирующих по замкнутым маршрутам с целью мониторинга состояния этих деталей.

Для эксперимента были отобраны детали по следующим критериям:

- детали без дефектов (1-я группа);
- детали с литейными дефектами, обнаруженными другими методами – визуально, магнитными, при ультразвуковой толщинометрии (2-я группа);
- детали с трещинами различного происхождения (3-я группа).

Всего в эксперименте диагностировали 40 боковых рам и 20 надрессорных балок, предварительные данные о числе которых в разных выделенных группах приведено в таблице 7.9. В деталях третьей группы были трещины усталостные или литейные горячие (что определено по макрофрактографическому анализу изломов).

Все детали были проконтролированы системой СЦАД-16.03 по методике, приведенной в работе [297], используемой для контроля литых деталей данной аппаратурой. Количество прогнозируемых циклов определяли по формуле

$$N = K_{ин} \cdot \lambda \cdot \sqrt{-\ln(1 - P(N))}, \quad (7.22)$$

где  $P(N)$  – заданная вероятность безотказной работы искомого количества циклов, принятая при расчетах равной 0,95.  $K_{ин}$  определяли по формуле

$$K_{ин} = \frac{k_0 \cdot \sigma_{0,2}}{\sigma_p}, \quad (7.23)$$

где  $k_0$  – коэффициент, определенный опытным путем из экспериментальных данных, приведенных на рисунке 6.18,  $a$ , и равный 948,5.

$$\lambda = \sum_{i=0}^m \frac{P_{max}}{E_i \cdot P_i}, \quad (7.24)$$

где  $E_i$  – энергия каждого отдельного сигнала АЭ из локального источника, идентифицированного и имеющего общее число излученных сигналов  $m$ . Параметр  $\alpha$  определяли по формуле (7.21).

Таблица 7.9 – Сведения о литых деталях, использованных для диагностирования их ресурса вероятностным способом

Деталь	1-я группа	2-я группа	3-я группа
Боковая рама	19	15	6
Надрессорная балка	7	9	4

Полученные результаты показывают, что большинство деталей первой группы, за исключением одной детали, имеют рассчитанный таким образом ресурс  $N > 10^8$  циклов, а локальные источники имели не более трех сигналов каждый. Одна надрессорная балка из первой группы имела источник, ресурс которого был менее  $10^3$  циклов, а источник находился в одной из наклонных плоскостей детали. Более тщательный контроль области источника показал, что дефектная наклонная плоскость имеет большой износ и требует ремонта наплавкой (допустимой для данного типа деталей).

Среди деталей второй группы были детали с литейными песчаными и газовыми раковинами, выходящими на поверхность, неслитины, сосредоточенная газовая пористость. Для деталей второй группы были получены аналогичные первой группе результаты испытаний, кроме того, что рассчитанное число циклов  $N < 10^5$  было получено для двух боковых рам и одной надрессорной балки. Это значительно меньше числа циклов, которому подвергаются литые детали в процессе межремонтной эксплуатации (нормативный межремонтный пробег составляет 110 или 160 тыс. км). Во всех трех случаях с активными источниками АЭ каждый из них находился в области литейного дефекта. Это совпадение позволяет предполагать, что на таком дефекте уже начался процесс усталостного разрушения и, хотя в данном случае металловедческий анализ не проводился, исследования, представленные в разделе 6.3, показывают наличие необратимых изменений металла на таких участках.

Во всех случаях испытания деталей третьей группы с трещинами, за исключением одного на боковой раме, были выявлены активные и критически активные

источники АЭ с рассчитываемым числом циклов  $N < 10^5$ . В единственном случае, когда источник оказался пассивным, дефектный участок был вырезан и доломан на машине копрового типа с последующим анализом излома. Трещина на всей поверхности имела темную поверхность со следами дендритного строения, что говорит о ее литейном происхождении. Наличие участков усталостного развития в изломе обнаружено не было, следовательно, она не развивалась. Кроме того, при доломе разрушающее усилие превысило расчетное для стали 20ГФЛ на 40 %, что говорит о структуре металла в области вершины трещины с повышенной прочностью.

Разработанная методика была применена на предприятиях при диагностике состояния литых деталей, и результаты ее использования приводятся в [298, 299]. Характерные рассчитанные параметры вероятностного способа для некоторых деталей приведены в таблице 7.10. Методика предполагает продлевать ресурс до нового полного освидетельствования деталей (на межремонтный период) в случае если  $N > 10^8$ . Если же рассчитываемый ресурс менее  $10^5$  циклов, то деталь следует браковать. Если же рассчитываемый ресурс находится в диапазоне  $10^5 < N < 10^8$ , то для детали определяется допустимый ресурс и рекомендуемые условия эксплуатации.

Признанные годными детали после диагностики эксплуатировались в обычном рабочем режиме в замкнутых маршрутах, в том числе детали с литейными неразвивающимися дефектами. Повторный АЭ контроль через 6 и 9 месяцев эксплуатации не выявил наличия активных источников АЭ.

Таким образом, разработанная вероятностная методика оценки ресурса доказала право на свое существование применительно к литым деталям тележек грузовых вагонов. Универсальный характер вероятностной модели позволяет говорить о возможности ее применения и к другим техническим объектам, оценка ресурса которых является важной технической проблемой.

Таблица 7.10 – Результаты испытаний боковых рам с определением их остаточного ресурса в циклах  $N$  с вероятностью безотказной работы 0,95

№ детали	$E_{\Sigma}, \text{ мВ}^2$	$\alpha$	$\lambda$	$K_{\text{ин}}$	$N$
Детали с продленным ресурсом					
6492	2,6	0,027	1,3	701,9	$2,4 \cdot 10^{20}$
20301	0,97	0,034	0,388	569,1	$1,58 \cdot 10^{17}$
Забракованные детали					
29114	203	0,129	142,1	379,4	$1,33 \cdot 10^4$
10973	265	0,109	148,4	370,0	$6,1 \cdot 10^4$
569667	93,7	0,133	64,7	407,9	$2,4 \cdot 10^4$

### Выводы по седьмой главе

Проведенные исследования показали принципиальную возможность разработки разных методик оценки параметров ресурса с использованием метода АЭ для таких сложных технических объектов, как литые детали тележек грузовых вагонов.

Разработана методика АЭ контроля с определением интегральных критериев оценки источников АЭ и определения параметров ресурса боковых рам и надрессорных балок. Такой подход удачно сочетается с моделью технологической диагностики в межремонтные периоды боковых рам и надрессорных балок на стационарных вагоноремонтных предприятиях. Приведенная методика внедрена и используется для продления ресурса литых деталей грузовых вагонов железных дорог Российской Федерации. Методика позволяет ее использовать как самостоятельно, что видимо, будет снижать достоверность получаемых результатов, так и совместно с другими применяемыми методиками НК для оценки состояния боко-

вых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов в условиях вагоноремонтных предприятий.

Разработана методика ФЗ контроля, позволяющая обеспечить более равномерную чувствительность к полям рассеяния дефектов литых деталей и, как следствие, повысить достоверность контроля этих объектов.

Разработана вероятностная методика диагностирования остаточного ресурса на основе метода АЭ, которая может быть применена для широкого круга технических объектов, контролируемых этим методом.

Проведены экспериментальные исследования изменения параметров сигналов АЭ при периодических статических нагружениях образцов, испытывающих между этапами диагностирования циклические нагрузки. Такие исследования позволили получить закономерности изменения параметров АЭ (таких как суммарный счет, энергия сигналов от развивающегося источника, коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника, активность источника) развивающейся усталостной трещины. Полученные экспериментальные результаты позволили встроить эмпирические закономерности в вероятностную методику оценки ресурса применительно к боковым рамам и надрессорным балкам грузовых вагонов – объектам с чрезвычайно низкой контролепригодностью для методов НК.

Разработанная вероятностная методика диагностирования ресурса литых деталей была успешно опробована на реальных шестидесяти объектах с последующим использованием проконтролированных боковых рам и надрессорных балок, не имеющих активных источников АЭ в нормальных условиях эксплуатации.

Полученные методики позволили повысить достоверность АЭ контроля в целом и применительно к оценке ресурса в частности, что выборочно подтверждено металлографическими исследованиями образцов, в том числе вырезанных из проконтролированных деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены вопросы методологии АЭ диагностики изделий с низкой контролепригодностью – литых стальных деталей сложной формы на примере боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов.

При исследовании дефектности литых деталей грузовых вагонов использованы методики оценки достоверности контроля изделий, позволяющие оценить долю перебраковки и недобраковки в выборке диагностируемых изделий. Универсальность методики позволяет применять ее для оценки эффективности контроля достаточно широкого круга технических объектов, что продемонстрировано на других типах деталей (тяговый хомут и корпус автосцепного устройства подвижного состава). Данную методику можно применять как для диагностического комплекса методов относительно одного типа объекта, так и отдельных методов и средств контроля.

Проведен статистический анализ разрушений литых деталей, который подтвердил данные расчетов о напряженном состоянии литых деталей тележки грузового вагона. Полученные данные можно использовать для совершенствования методов определения надежности литых деталей, ремонта и их эксплуатации.

Рассмотрены теоретические аспекты формирования сигналов на приемных преобразователях без учета влияния их характеристик от источников сил различной направленности. В результате исследований определено, что локальные источники типа развивающихся трещин могут излучать сигналы, имеющие более высокий коэффициент взаимной корреляции волновых пакетов, формируемых на приемнике на разных стадиях их роста. Кроме того, на коэффициент взаимной корреляции амплитуд сигналов, принятых разными преобразователями, влияет устойчивость направленности поля излучения локальных актов АЭ. Это позволяет ввести корреляционные коэффициенты для идентификации различных источни-

ков АЭ. Разработан алгоритм определения типов развивающихся дефектов в зависимости от исследованных корреляционных характеристик и отношения сигналов с высокими значениями энергии в общем числу сигналов от источника.

Исследованы параметры АЭ при испытании образцов низколегированных сталей, из которых изготавливаются литые детали тележки грузового вагона. Экспериментально доказано, что значение суммарного и среднего коэффициента взаимной корреляции между сигналами одного источника АЭ за период испытаний связаны со стадиями развития усталостной трещины.

Определена связь параметров степенной зависимости от напряжений суммарного счета АЭ и суммарной энергии сигналов для низколегированных сталей для литых деталей грузовых вагонов с величиной развивающейся трещины и коэффициентом интенсивности напряжений в ее вершине. Кроме того, установлено, что при увеличении напряженного состояния в вершине концентратора возрастает дисперсия по амплитуде и энергии сигналов АЭ.

Разработанные способы получения и обработки АЭ информации были применены при идентификации и оценке параметров дефектов на боковых рамах и надрессорных балках грузовых вагонов.

Испытания образцов с концентратором из низколегированной литой стали при чередующейся циклической и статической нагрузках показали корреляционную связь потоковых параметров АЭ, полученных при циклической и последующей статической нагрузках. Это позволяет использовать эту связь для прогнозирования поведения усталостной трещины. Кроме того, установлено, что на потоковые параметры АЭ существенное влияние оказывает наличие макроскопических дефектов литья, находящихся на пути развивающейся трещины. Это увеличивает неопределенность значений прогнозируемого ресурса и срока эксплуатации материала при статическом нагружении реальных объектов контроля.

Разработан способ оценки достоверности определения координат источников АЭ в зависимости от параметров сигналов АЭ на основе формулы Байеса. Полученные связи погрешности определения координат источников АЭ с максимальной амплитудой и временем нарастания сигналов позволяют использовать

вероятностную методику для повышения точности определения локации источников АЭ. Установлено, что в зависимости от величины собственных параметров сигнала, таких как максимальная амплитуда и время нарастания сигнала зависит выбор наиболее точного метода и вероятность погрешности определения координат.

Предложено применение антенн, в которых основные приемники устанавливаются в непосредственной близости к наиболее потенциально опасными участками контролируемых изделий. Это позволяет методически повысить информативность контроля и достоверность идентификации источников АЭ на участках наиболее вероятного обнаружения дефектов. Также предложена функциональная схема АЭ системы, реализующая трехуровневый подход к регистрации сигналов и их обработке с фиксацией локализованных сигналов, несущих основную информацию об источнике, нелокализованных сигналов от источника и непрерывной эмиссии, которая может возникнуть при множественных очагах изменений структуры в наиболее нагруженной области диагностируемого изделия.

Экспериментально подтверждено, что АЭ испытания с использованием нескольких циклов испытательной нагрузки (для литых деталей тележки оптимальное значение – до семи циклов) существенно повышает достоверность оценки дефектных участков контролируемых изделий.

Предложены способы, позволяющие использовать метод АЭ для оценки технического состояния литых деталей сложной формы. В качестве значимых параметров для определения состояния объекта использованы суммарная энергия сигналов от источника, коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника, коэффициент нагрузки. Это позволило усовершенствовать интегральные критерии оценки состояния деталей при их АЭ контроле, а также учитывать величину нагрузки на разных участках контролируемых деталей.

Проведенные АЭ испытания литых деталей, последующее подтверждение результатов контроля другими методами НК и металлографическая экспертиза позволили идентифицировать источники АЭ и адекватно оценить пригодность деталей к эксплуатации. Последующая опытная эксплуатация боковых рам и

надрессорных балок с пассивными источниками АЭ, определенными как неопасные по результатам предлагаемой диагностики, доказала надежность использованной методики оценки состояния деталей.

В работе предложена вероятностная методика оценки ресурса с использованием данных АЭ контроля, применимого для литых деталей тележки. Дополнительно определены параметры вероятностной оценки, учитывающие особенности материала и размеров объектов контроля с учетом задаваемой вероятности безотказной работы контролируемых изделий которые использовали для определения параметров ресурса.

Тенденции развития техники АЭ контроля показывают, что продвижение в направлении повышения чувствительности АЭ метода и совершенствования аппаратуры ведет к развитию методик получения и обработки информации, а также разработке новых более совершенных технологий использования АЭ метода для контроля объектов сложного структурного состояния, неравномерно напряженного состояния и сложной формы.

**Библиографический список**

1. *Дробот, Ю. Б.* Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
2. *Андрейкив, А. Е.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак ; отв. ред. В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1989. – 176 с.
3. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. ; под ред. Л. Н. Степановой. – М. : Радио и связь, 2000. – 280 с.
4. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин и др. ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. А. Семашко, канд. техн. наук В. И. Шпорта. – М. : Машиностроение, 2002. – 240 с.
5. Неразрушающий контроль : справ. : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7 : в 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Балицкий Ф. Я., Барков А. В., Баркова Н. А. и др. Вибродиагностика. – М. : Машиностроение, 2006. – 829 с.
6. *Дробот, Ю. Б.* Акустическое контактное течеискание / Ю. Б. Дробот, В. А. Грешников, В. Н. Бачегов. – М. : Машиностроение, 1989. – 120 с.
7. *Иванов, В. И.* Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 180 с.
8. *Серьезнов А.Н.* Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров и др. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с.
9. Акустическая эмиссия при трении / В. М. Баранов, Е. М. Кудрявцев, Г. А. Сарычев, В. М. Щавелин. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 256 с.
10. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М. :

ГУП «Научно-технический центр по безопасности и промышленности Госгортехнадзор России», 2003. – 56 с.

11. *Гуменюк, В. А.* Современные возможности и тенденции развития акустико-эмиссионного метода / В. А. Гуменюк, В. А. Сульженко, А. В. Яковлев // В мире неразрушающего контроля. – 2000. – № 3(9). – С. 8–12.

12. Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu. Acoustic Emission Testing. – Springer, 2008 – 408 p.

13. *Буйло, С. И.* Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики / С. И. Буйло. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2008. – 192 с.

14. *Булнина, Н. А.* Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. – Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1990. – 156 с.

15. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров и др. ; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьева. – М. : Машиностроение, 2004. – 368 с.

16. *Космынин, А. В.* Кинетика процесса разрушения образцов из быстрорежущих сталей по параметрам акустической эмиссии / А. В. Космынин, С. П. Чернобай // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 4. – С. 26–28.

17. *Лисицын, К. А.* Результаты механических испытаний сварных соединений паропроводов из углеродистых сталей методом акустической эмиссии / К. А. Лисицын, А. В. Патанин // Инновации в науке. – 2012. – № 14-1. – С. 81–87.

18. *Зубенко, Д. Ю.* Прогнозирование долговечности деталей ПС ЭТ методом акустической эмиссии / Д. Ю. Зубенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5. – № 7. – С. 14–16.

19. *Акопьян, В. А.* Деформационный критерий состояния предразрушения элементов ферменных конструкций и акустоэмиссионно-резонансная методика на его основе / В. А. Акопьян // Дефектоскопия. – 2009. – № 3. – С. 23–31.

20. Пат. 2445615 РФ. Способ определения прочности материала изделия / В. В. Носов, Е. Н. Лахова. – 2010145698/28 ; заявл. 09.11.2010 ; опубл. 20.03.2012, Бюл. № 12. – 7 с.
21. Estimation of bearing defect size with acoustic emission / A.M. Al-Ghamdi et al // *Insight*. 2004, v. 46, № 12, p. 758–761.
22. *Elforjani M., Mba D.* Defecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a slow rotating thrust bearing with acoustic emission // *Insight*. 2008, v. 50, № 5, p. 264–268.
23. *Соколкин, А. В.* Исследование акустико-эмиссионных характеристик стали 09Г2С при коррозионно-механическом разрушении / А. В.Соколкин, Ю. И. Филиппов, В. В. Сагарадзе и др. // *Физика металлов и металловедение*. – 2003. – Т. 96. – Вып. 4. – С. 90–96.
24. *Панин, С. В.* Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. 1. Образцы с отверстиями различного диаметра / С. В. Панин, А. В. Бяков, П. С. Лобутин, О. В. Башков // *Дефектоскопия*. – 2011. – № 9. – С. 47–62.
25. *Панин, С. В.* Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / С. В. Панин, А. В. Бяков, В. В. Гренке и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2009. – Т. 12. – № 6. – С. 63–72.
26. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals / Panin S.V. et al. // *Proceedings IFOST'2009*, 21–23 October, 2009, Ho Chi Ming City, Vietnam, v. 3, p. 202–206.
27. *Буйло, С.И.* Связь параметров акустической эмиссии растущей трещины с коэффициентом интенсивности напряжений и типом напряженного состояния / С. И. Буйло // *Дефектоскопия*. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
28. *Гирфанова, А. А.* Применение оптико-акустического метода для изучения процессов разрушения образцов со сварным соединением, полученным линейной

сваркой трением / А. А. Гирфанова, Я. И. Наседкина, Р.Р. Гринь и др. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – № 7. – С. 102–107.

29. Чуканов, А. Н. Механическая спектроскопия в излучении субструктурной деградации углеродистой стали / А. Н. Чуканов, А. А. Яковенко, И. Ф. Широкий // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – № 4–2. – С. 1625–1626.

30. Буйло, С. И. Об информативности метода инвариантов при анализе прожженных потоков акустической эмиссии / С. И. Буйло // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 41–45.

31. Буйло, С. И. Метод идентификации стадий деформации и разрушения по положению особых точек восстановленного потока актов АЭ / С. И. Буйло // Дефектоскопия. 2008. – № 8. – С. 3–14.

32. Буйло, С. И. Связь амплитуды акустического излучения ансамбля микродефектов со скоростью деформации и восстановлению количества актов АЭ при изменении динамического диапазона регистрируемых сигналов / С. И. Буйло // Дефектоскопия. – 2007. – № 3. – С. 69–77.

33. Панин, С. В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16Т по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. II Образцы с надпилами различной глубины / С. В. Панин, А. В. Бяков, П. С. Любутин, О. В. Башков // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 43–54.

34. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 376 с.

35. Носов, В. В. Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов / В. В. Носов // Тр. Междунар. науч. конф. 26–29 окт. 2004 г. – СПб.: Изд-во ЛПУ, 2004. – С. 77.

36. Носов, В. В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций с помощью метода акустической эмиссии / В. В. Носов // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 58–66.

37. Пат. 2445616 РФ. Способ неразрушающего контроля прочности металлоконструкций / В. В. Носов, Г. С. Ельчаинов, Д. С. Тевосянц. – 2010150121/28; заявл. 6.12.2010; опубл. 20.03.2012, Бюл. № 8. – 9 с.
38. *Корчевский, В. В.* Акустическая эмиссия при пластическом деформировании поликристаллов // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5. – С. 42–48.
39. *Сысоев, О. Е.* Автоматизированная система мониторинга предельных состояний конструкций зданий и сооружений // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 107–112.
40. *Воронова, Н. И.* Испытание цистерн избыточным давлением / Н. И. Воронова, Н. Е. Разинкин // Мир транспорта. – 2012. – Т. 41. – № 3. – С. 108–111.
41. *Рощупкин, В. В.* Применение метода акустической эмиссии для изучения кинетики разрушения металлов / В. В. Рощупкин, М. А. Покрасин, А. И. Чернов и др. // Перспективные материалы. – 2011. – № 13. – С. 928–931.
42. *Черняева, Е. В.* Оценка усталости металлов спектрального анализа сигналов акустической эмиссии / Е. В. Черняева // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 7. – С. 42–47.
43. Пат. 2380698 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля колесных пар вагонов / В. В. Муравьев, С. И. Тимков. – 2008128497/28 ; заявл. 15.07.2008 ; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 14 с.
44. *Попов, А. В.* Феноменологическая модель реакции пьезодатчика на импульсы акустической эмиссии / А. В. Попов, Е. А. Кондранин, В. Э. Жумай // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 33–38.
45. *Кобзев, В. А.* Акустико-эмиссионный контроль разрушения двухсекционного компенсатора в условиях малоциклового усталости / В. А. Кобзев, С. А. Белов, М. А. Оразова, Д. Г. Рязов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 51–56.
46. *Носов, В. В.* Моделирование акустической эмиссии сварных соединений металлоконструкций / В. В. Носов // Неразрушающий контроль и диагностика

окружающей среды, материалов и промышленных изделий : межвуз. сб. тр. – Вып. 11. – СПб., 2005. – С. 89–98.

47. *Скальский, В.Р.* Методика оцінки статичної тріщиностікості ресорної сталі / В. Р. Скальский, О. С. Дубицкий // Технологічні комплекси. – 2012. – № 1–2. – С. 169–175.

48. *Кудря, А.В.* Количественная оценка разрушения по акустической эмиссии в различных масштабах измерения / А. В. Кудря, Е. А. Марков // Материаловедение. – 2007. – № 1. – С. 13–18.

49. *Кудря, А. В.* Классификация источников акустической эмиссии в тонкой пластине по различиям структуры сигналов / А. В. Кудря, Е. А. Марков // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 6. – С. 32–38.

50. *Овчарук, В. Н.* Вопросы эффективности параметров акустической эмиссии / В. Н. Овчарук // Сб. тез. докл. XIX Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6–8 сент. 2011 г. – М. : Спектр, 2011. – С. 337–339.

51. *Овчарук, В. Н.* Особенности измерения энергетических параметров акустической эмиссии / В. Н. Овчарук // Сб. тез. докл. XIX Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6–8 сент. 2011 г. – М. : Спектр, 2011. – С. 334–336.

52. *Носов, В. В.* Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В. В. Носов, А. И. Потапов, И. Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 48–57.

53. *Овчарук, В. Н.* Исследование свойств амплитудно-частотных характеристик линейно протяженных объектов методами неразрушающего контроля / В. Н. Овчарук, Х. Цинь // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2013. – № 1. – С. 93–99.

54. *Башков, О. В.* Исследование и идентификация механизмов деформации и разрушения стали 12Х18Н10Т методом акустической эмиссии / О. В. Башков, С. В. Панин, Т. И. Башкова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – Т. 1. – № 2. – С. 145–154.

55. *Петрова, В. А.* Применение метода акустической эмиссии (АЭ) для исследования поврежденности металла паропроводов ТЭС в лабораторных условиях / В. А. Петрова [и др.] // *Инновации в науке.* – 2012. – № 14-1. – С. 114–121.

56. *Мерсон, Д.Л.* Спектральные характеристики акустической эмиссии и механические свойства трубной стали в зависимости от температуры отпуска / Д. Л. Мерсон, Е. В. Черняева // *Деформация и разрушение материалов.* – 2005. – № 5. – С. 24–27.

57. *Черняева, Е.В.* Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости / Е. В. Черняева [и др.] // *Сварка и диагностика.* – 2010. – № 2. – С. 50–57.

58. *Овчарук, В. Н.* Программно-аналитический комплекс акустико-эмиссионной измерительной системы / В. Н. Овчарук // *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах.* – 2013. – № 1 (42). – С. 45–53.

59. *Мерсон, Д. Л.* Связь механических характеристик стали 35Г2 с содержанием водорода и параметрами акустической эмиссии / Д. Л. Мерсон [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2008. – № 2. – С. 57–60.

60. *Наседкин, А. В.* Применение конечно-элементных методов для расчета приемных систем акустико-эмиссионного контроля / А. В. Наседкин [и др.] // *Дефектоскопия.* – 2006. – № 2. – С. 16–27.

61. *Башков, О. В.* Применение вейвлет-анализа для идентификации источников акустической эмиссии при деформации и разрушении поликристаллических материалов / О. В. Башков, Д. А. Шпак, И. М. Гололобова // *Мат-лы VIII российско-китайского симпозиума «Modern materials and technologies – 2007».* – г. Хабаровск. – 17–18 окт. 2007. – Ч. 2. – С. 83–87.

62. *Аверин, П.И.* Вариант решения задачи прогнозирования признаков разрушения металлов с помощью нейронных сетей на основе данных вейвлет-анализа импульсов акустической эмиссии / П. И. Аверин, Н.И. Крайнюков // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета.* – 2011. – № 4. – С. 28–32.

63. *Bashkov O. V., Shpak D. A.* Identification of acoustic emission sources at scale levels of plastic deformation. /2008 Joint China-Russia Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. Harbin, China, June 16 – June 20, 2008. – P. 365 – 370.
64. *Башков, О. В.* Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12X18H10T / О. В. Башков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 10. – С. 51–57.
65. *Rafiee J., Tse P.F., Harif A. et al.* A novel technique for selecting mother wavelet function using an intelligent fault diagnosis system. – Expert systems with application, 2009, v. 36, p. 4862–4875.
66. *Grabovska J., Palacz M., Kravczuk M.* Damage identification by wavelet analysis. – Mechanical systems and signal processing, 2008, v. 22, p. 1623–1635.
67. *Бабичева, И.Ф.* Теоретические разработки по использованию вейвлет-анализа и нейросетевых технологий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования / И. Ф. Бабичева, А. В. Шарко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 2. – С. 17–21.
68. *Терентьев, Д. А.* Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах / Д. А. Терентьев, С. В. Елизаров // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 7. – С. 51–53.
69. *Мандель, И. Д.* Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
70. *Аверин, П. И.* Интеллектуальная обработка цифровых осциллографических данных импульсов акустической эмиссии при пластической деформации металлов / П. И. Аверин // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 43–49.
71. *Серьезнов, А. Н.* Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов и др. ; под ред. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьезнова. – М. : Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2008. – 440 с.

72. *Степанова, Л. Н.* Разработка метода кластеризации по параметрам сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова Л.Н. [и др.] // Дефектоскопия. – 2010. – № 2. – С. 78–89.
73. *Степанова, Л. Н.* Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа / Л. Н. Степанова, К. В. Канифадин, С. А. Лазненко // Дефектоскопия. – 2010. – № 1. – С. 73–82.
74. *Бархатов, В. А.* Обнаружение сигналов и их классификация с помощью распознавания образов / В. А. Бархатов // Дефектоскопия. – 2006. – № 4. – С. 14–27.
75. *Степанова, Л. Н.* Контроль колец подшипников локомотива методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 49–55.
76. *Серьезнов, А. Н.* Расчетно-экспериментальный АЭ-метод определения координат дефектов в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 2000. – № 6. – С. 71–79.
77. *Кареев, А. Е.* Влияние погрешностей координат установки датчиков пьезоантенны на точность локализации источников сигналов акустической эмиссии / А. Е. Кареев, Л. Н. Степанова, Е. С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 21–28.
78. *Степанова, Л. Н.* Методика определения координат дефектов при акустико-эмиссионном контроле свободных колец подшипников / Л. Н. Степанова [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 4. – С. 61–65.
79. *Бондаренко, А.Н.* Методы определения времени начала импульса акустической эмиссии и их сравнение / А. Н. Бондаренко, С. Ю. Петров // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 9. – С. 28–33.
80. *Муравьев, В. В.* Анализ погрешностей определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В. В. Муравьев, С. А. Бехер, К. В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – № 7. – С. 53–59.

81. Степанова, Л. Н. Локализация источников сигналов акустической эмиссии с учетом погрешностей измерения скорости звука и времени их прихода на датчики пьезоатенны / Л. Н. Степанова [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 10. – С. 60–64.
82. Пат. 2425362 РФ. Способ определения местоположения источников акустической эмиссии с помощью одного приемника / О. В. Башков, В. А. Ким, Д. А. Шпак – 2009114768/28 ; заявл. 21.04.2009 ; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 21. – 11 с.
83. Степанова, Л. Н. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, И. С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 15–19.
84. Kurokawa Y., Mizutani Y., Mayuzumi M. Real-time executing source location system applicable to anisotropic thin structure // Journal of Acoustic Emission. – 2005. – (23). – P. 224–232.
85. Гуменюк, В. А. Акустико-эмиссионный контроль монтажных сварных швов судовых трубопроводных систем / В. А. Гуменюк [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 9. – С. 36–40.
86. Недосека, С. А. Особенности обработки данных акустической эмиссии при использовании сложных и множественных локационных антенн / С. А. Недосека, М. А. Овсиенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 2. – С. 7–12.
87. Недосека, А. Я. Определение координат развивающихся дефектов на цилиндрических поверхностях / А. Я. Недосека [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 1. – С. 11–13.
88. Condition loading effect upon informative parameters and spectrum of acoustic emission signals in carbon steels specimen / Murav'ev V.V., Murav'ev M.V., Bekher S.A. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2002. T. 38. № 7. С. 483–492.
89. Peculiarities of acoustic emission signals in evaluation of fracture mechanism in welden joints on aluminum alloys / Skalsky V.R., Lyasota I.N., Stankkevich E.M. // The Paton Welding Journal. – 2013. – № 1. – P. 21–27.

90. *Растегаев, И. А.* Локация шумоподобных источников акустической эмиссии способом спектрального подобия / И. А. Растегаев [и др.] // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 3–13.
91. Пат. 2398225 РФ. Способ определения дефектов в структуре деталей / В. А. Акимов, С. А. Качанов, Л. В. Винокуров. – 2009124122/28 ; заявл. 25.06.2009 ; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 10 с.
92. *Дробот, Ю. Б.* Сравнение двух методов локации источников акустической эмиссии / Ю. Б. Дробот, Е. Н. Романова // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 9. – С. 23–25.
93. *Болотин, Ю. В.* К вопросу о регистрации эмиссии в пределах упругой деформации / Ю. И. Болотин [и др.] // Тез. докладов VIII Всесоюзной науч.-техн. конф. по неразрушающим физическим методам и средствам контроля. – Кишинев, 1977. – С. 511–514.
94. *Сысоев, О. Е.* Прогнозирование длительной прочности конструкционных материалов на основе фрактального анализа акустической эмиссии / О. Е. Сысоев, С. В. Биленко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – Т. 1. – № 11. – С. 107–115.
95. *Сысоев, О. Е.* Современные испытательные стенды для исследования конструкционных материалов при малоцикловых нагрузках в условиях сложного напряженного состояния с учетом параметров акустической эмиссии / О. Е. Сысоев [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – № I–1(9). – С. 106–112.
96. *Носов, В. В.* Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов / В. В. Носов, Г. С. Ельчанинов // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 55–66.
97. *Жуков, А. В.* Контроль трубопроводов с применением метода акустической эмиссии / А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин, Н. Ф. Стюхин // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 1. – С. 29–31.

98. *Шитов, Д. В.* Локализация дефектов на оборудовании, работающем под давлением, с помощью метода акустической эмиссии / Д. В. Шитов, А. В. Жуков // ТехСовет. – 2011. – № 12. – С. 50–52.

99. *Недосека, А. Я.* Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 3. – С. 11–17.

100. *Крупский, Р. Ф.* Использование комплексных параметров акустической эмиссии для исследования кинетики пластической деформации и разрушения конструкционных сталей / Р. Ф. Крупский, Т. А. Муратова, Н. А. Семашко // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 5. – С. 13–15.

101. *Муравьев, В. В.* Акустико-эмиссионный контроль боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Сб. тез. докл. XIX Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6–8 сент. 2011 г. – М. : Спектр, 2011. – С. 344–346.

102. *Криштал, М. М.* Спектральные особенности акустической эмиссии и макролокализация деформации при прерывистой текучести сплава АМг6 / М. М. Криштал [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 1. – С. 28–35.

103. *Шибков, А. А.* Акустическая эмиссия при распространении полосы Людерса в сплаве АМг6 / А. А. Шибков [и др.] // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2010. – Вып. 3. – Т. 10. – С. 1269–1273.

104. *Попов, А. В.* Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик акустико-эмиссионных процессов / А. В. Попов, Е. А. Кондрашин // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 7. – С. 45–46.

105. *Попов, А. В.* Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов / А. В. Попов, В. Э. Жумай // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 10. – С. 29–31.

106. *Скальский, В. Р.* Акустическое диагностирование нефтетранспортного оборудования / В. Р. Скальский [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 8. – С. 50–54.

107. *Eftekharnjad B., Mba D.* Acoustic emission signals associated with damages helical gears // *Insight*. – 2008. – v. 50. – № 8. – P. 450–453.

108. *Быков, С. П.* Акустическая эмиссия при росте трещин в вязкоупругом материале / С. П. Быков, В. И. Иванов // Заводская лаборатория. – 2008. – № 9. – С. 47–52.

109. *Муравьев, В. В.* Анализ результатов эксплуатации акустико-эмиссионных стенов для контроля литых деталей тележек железнодорожных грузовых вагонов / В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 136–143.

110. *Беликов, В. Т.* Восстановление структурных характеристик разрушающегося твердого тела по амплитудно-частотному спектру акустической эмиссии / В. Т. Беликов // Дефектоскопия. – 2010. – № 1. – С. 56–63.

111. *Беликов, В. Т.* Использование амплитудно-частотного спектра акустической эмиссии для восстановления функции распределения трещин по размерам / В. Т. Беликов, Д. Г. Рывкин // Дефектоскопия. – 2010. – № 10. – С. 26–33.

112. *Silva R. R., Mery D., Soares S. D.* Evaluation of acoustic emission signal parameters for identifying the propagation of defects in pressurized tubes, *Insight*. – 2008. – № 8. – P. 493–500.

113. *Carvalho, A. A. Siqueira, M.H.S. Silva, I.C.Ivan C. da Silva, Rebello, J.M.A.* Automatic Testing of Rigid Risers Using Time of Flight Diffraction and Neural Networks // *Materials Evaluation*. – 2004. – v. 62. – № 10. – P. 1066–1070.

114. Пат. 2424510 РФ. Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам и устройство для его осуществления / Л. Н. Степанова [и др.]. – 2009127178/28 ; заявл. 17.07.2009 ; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20. – 21 с.

115. *Иванов, Б. Г.* Применение акустико-эмиссионного метода для диагностики конструкций гидротехнических сооружений // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 3. – С. 57–59.

116. *Сыч, Т. В.* Численное моделирование акустической эмиссии при исследовании элементов мостовых конструкций / Т. В. Сыч [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 212–221.

117. *Арумугам, В.* Эффективность применения нечеткой логики для обнаружения разрушения в пластинах из композита стекло – эпоксидная смола при акусто-эмиссионном мониторинге / В. Арумугам [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 99–107.

118. *Корчевский, В. В.* Контроль размерной стабильности акустико-эмиссионным методом / В. В. Корчевский // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 9. – С. 25–28.

119. *Ботвина, Л. Р.* Особенности статического, ударного и усталостного разрушения образцов из стали 06МБФ с субмикроструктурной структурой / Л. Р. Ботвина [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – № 1. – С. 43–49.

120. *Серьезнов, А. Н.* Использование микропроцессорных акустико-эмиссионных систем при ресурсных испытаниях самолета / А. Н. Серьезнов [и др.] // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 35–42.

121. *Степанова Л. Н.* Использование кластерного анализа для определения связи сигнала акустической эмиссии с характером разрушения в металлических образцах / Л. Н. Степанова, А. Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 9. – С. 18–23.

122. Пат. 2480742 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля / К. В. Хилков, Г. В. Флеганова, М. О. Тарасов. – 2011140776/28 ; заявл. 10.10.2011 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 11 с.

123. *Серьезнов, А. Н.* Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при ресурсных испытаниях тяжелого самолета / А. Н. Серьезнов [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5. – С. 58–66.

124. *Степанова, Л. Н.* Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта / Л. Н. Степанова [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27–35.

125. Reliability of acoustic emission as a technique to detect corrosion and stress corrosion cracking on prestressing steel strands / L. Djeddi, R. Khelif, S. Benmedakhe, J. Favergeon // International Journal of Electrochemical Science. – 2013. – № 8. – P. 8356–8370.

126. *Кузьмин, А. Н.* О механизме развития локальной коррозии. Акустико-эмиссионная диагностика коррозионных дефектов трубопроводов / А. Н. Кузьмин [и др.] // ТехНадзор. – 2007. – № 7. – С. 10–14.

127. Пат. 2437091 РФ. Способ оценки степени износа тележки железнодорожного вагона / Н. А. Семашко [и др.]. – 2010139790/28 ; заявл. 28.09.2010 ; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 8 с.

128. *Бородин, Ю. П.* Акустико-эмиссионный контроль котлов вагонов-цистерн / Ю. П. Бородин [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5. – С.53–58.

129. Acoustic Emission during tensile tests and ECAP / G. Por, L. Doszpot, A. Vekony at al. // 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada, 12–15 September 2012 / [http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/51\\_Por.pdf](http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/51_Por.pdf)

130. *Алешин, Н. П.* Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и диагностика. – 2007. – № 2. – С. 4–10.

131. Detection of the propagation of defects in pressurised pipes by means of the acoustic emission technique using artificial neural networks / R.R. da Silva at al. // Insight. – 2006. – № 1. – P. 45–51.

132. *Грешников, В. А.* Акустическая эмиссия / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.

133. *Lord A. E., Koerer Jr., Koerer R. M.* Fundamentals of Acoustic Emission. – Materials Department, School of Engineering & Applied Science, University of California, Los Angeles, California, 1979. – 261 p.

134. *Волковас, В.* Методологические аспекты оценки прочности и остаточного ресурса сосудов давления на основе акустико-эмиссионной диагностики // В. Волковас [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 11. – С. 50–61.

135. *Немчинов, В. М.* Система локализации и морфоанализа акустоэмиссионных сигналов / В. М. Немчинов [и др.] // Приборы и системы управления. – 1998. – № 10. – С. 63–66.

136. *Быков, С. П.* Вейвлет-анализ акустико-эмиссионных сигналов / С. П. Быков, А. В. Юшин, И.Н. Скрябиков // Неразрушающий контроль и диагностика : тез. докл. XVII Рос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 5–11 сент. 2005 г. Екатеринбург, 2005. – С. 120.

137. *Горбунов, И. А.* Оценка технического состояния металлических конструкций методом акустической эмиссии / И. А. Горбунов [и др.] // Прочность, надежность и долговечность строительных конструкций : сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГМА, 1994. – С. 34–50.

138. *Котельников, В. С.* Остаточный ресурс грузоподъемных кранов / В. С. Котельников, А. А. Зарецкий, В. С. Анисимов // Безопасность труда в промышленности. – 1998. – № 2. – С. 2–5.

139. *Серьезнов, А. Н.* Контроль усталостных повреждений при ресурсных испытаниях полуоси стабилизатора маневренного самолета с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии / А. Н. Серьезнов [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – С. 3–10.

140. *Семашко, Н. А.* Прогнозирование длительной прочности жаропрочной стали 10X11H23T3M3 (ЭП33) методом акустической эмиссии / Н. А. Семашко [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 7. – С. 3–4.

141. *Муравьев, В. В.* Использование акустико-эмиссионного контроля литых деталей подвижного состава при оценке ресурса / В. В. Муравьев [и др.] // Ульт-

развучковая дефектоскопия металлоконструкций : сб. докл. XVII петербургской конф. – СПб., 2001. – С. 134–138.

142. *Антипенко, Е. И.* Оценка эффективности метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов / Е. И. Антипенко, Н. Г. Висилковский, М. Б. Кельрих // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 4. – С. 11–14.

143. Пат. РФ 2141654. Способ акустоэмиссионного контроля изделия / В. Н. Бырин, М. Д. Косткин, А. В. Макшанов. – 98114884/28 ; заявл. 23.07.1998 ; опубл. 20.11.1999, Бюл. № 33. – 7 с.

144. *Абрамов, О. В.* Идентификация некоторых процессов эволюции дефектной структуры материала с источниками спонтанных акустических сигналов / О. В. Абрамов, О. М. Градов // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 6. – С. 15–21.

145. Пат. РФ 2193772. Способ прогноза остаточного ресурса стальных металлоконструкций / А. В. Берман [и др.] – 2001105893/28 ; заявл. 05.03.2001 ; опубл. 27.11.2002, Бюл. № 34. – 8 с.

146. Пат. РФ 2167421. Способ определения запаса прочности нагруженного материала / В. А. Петров. – 98118808/28; заявл. 09.06.1998 ; опубл. 10.03.2000, Бюл. № 7. – 6 с.

147. Пат. РФ 2366939. Способ определения остаточного ресурса стального железнодорожного ригеля / Т. С. Никольская, С. Г. Никольский. – 2007124613/28; заявл. 22.06.2007 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. – 6 с.

148. *Прус, Ю. В.* Акустико-эмиссионные параметры процессов при неупругом деформировании квазихрупких материалов / Ю. В. Прус // Дефектоскопия. – 1999. – № 8. – С. 73–77.

149. *Березин, А. В.* Акустическая эмиссия и деструкция пластически деформированного металла / А. В. Березин, А. И. Козинкина, Л. М. Рыбакова // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 9–14.

150. *Буйло, С. И.* Исследование особенностей акустического излучения при деформировании сплава титана и некоторые результаты АЭ диагностики его

предразрушающего состояния / С. И. Буйло, С. А. Березин // Дефектоскопия. – 2000. – № 8. – С. 3–11.

151. *Буйло, С. И.* Диагностика стадий деформации и разрушения по интегральным параметрам потока актов акустической эмиссии / С. И. Буйло // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 66–78.

152. *Семашко, Н. А.* Применение новых параметров акустической эмиссии для прогнозирования предельных механических характеристик титанового сплава ОТ4 / Н. А. Семашко, А. В. Фролов, В. И. Муравьев, М. М. Ляховицкий // Контроль. Диагностика.– 2002. – № 12. – С. 24–27.

153. *Носов, В. В.* Использование параметров амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии для оценки прочности конструкционных материалов / В. В. Носов, И. Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 15–21.

154. *Буйло, С. И.* О связи амплитуды сигналов акустической эмиссии со скоростью деформирования структуры материалов / С. И. Буйло, А. С. Трипалин // Проблемы прочности. – 1986. – № 2. – С. 101–103.

155. *Bujlo S. I., Tripalin A. S.* Use of statistic parameters of acoustic emission signals for quantitative measurement of the material structure fracture intensity // Proc. 3rd Europ. conf. NDT, Florence, Italy. – 1984. – № 4. – P. 332–341.

156. *Муравьев, В. В.* Влияние условий нагружения на информативные параметры и спектр сигналов акустической эмиссии в образцах углеродистых сталей / В. В. Муравьев, М. В. Муравьев, С. А. Бехер // Дефектоскопия. – 2002. – № 7.– С. 10–20.

157. *Муравьев В. В.* Применение новой методики обработки сигналов АЭ для повышения точности локализации дефектов / В. В. Муравьев, М. В. Муравьев, С. А. Бехер // Дефектоскопия.– 2002. – № 8. – С. 53–65.

158. *Буйло, С. И.* Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения / С. И. Буйло, А. В. Попов // Дефектоскопия.– 2001. – № 9. – С. 45–53.

159. *Муравьев, В. В.* Исследование процесса роста усталостной трещины в металлических образцах с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии / В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 81–90.

160. Нелинейная трансформация вероятностных распределений сигналов акустической эмиссии при эволюции ансамбля дефектов в твердом теле / В. А. Робсман // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 6. – С. 846–852.

161. *Семашко, Н. А.* Акустическая эмиссия при решении некоторых вопросов авиационного производства / Н. А. Семашко [и др.] // Авиационная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 85–89.

162. *Гуменюк, В. А.* Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики / В. А. Гуменюк [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 49–53.

163. *Расщепляев, Ю. С.* Оценка степени опасности дефектов на основе инвариантов при акустико-эмиссионном неразрушающем контроле / Ю. С. Расщепляев, А. В. Попов // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 3. – С. 29–32.

164. *Мирошин, И. В.* Оценка взаимосвязей параметров механического состояния металла с сигналами акустической эмиссии / И. В. Мирошин, О. А. Останин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 2. – С. 44–50.

165. *Завойчинский, Б. И.* Методика определения срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Часть 1. Определение вероятности разрушения и сроков безопасной эксплуатации и очередного обследования участка / Б. И. Завойчинский, Э. Б. Завойчинская // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5. – С. 15–23.

166. *Баско, Е. М.* Оценка ресурса и трещиностойкости шаровых резервуаров для хранения жидкого аммиака / Е. М. Баско [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – № 7. – С. 36–41.

167. *Недосека, А. Я.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 2. – С. 5–19.

168. Недосека, С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3–9.

169. Аверин, П. И. Вариант решения задачи прогнозирования признаков разрушения металлов с помощью нейронных сетей на основе данных вейвлет-анализа импульсов акустической эмиссии / П. И. Аверин, Н. И. Крайнюков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 28–32.

170. Романишин, И. М. Применение статистических подходов к оцениванию степени деградации материала / И. М. Романишин // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 36–43.

171. Савельев, В. Н. Акустико-эмиссионный контроль технических устройств в эксплуатационном режиме на опасных производственных объектах / В. Н. Савельев, Д. В. Савельев, А. П. Тишкин // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 22–27.

172. Лахова, Е. Н. Оценка остаточного ресурса пластически деформируемых сварных соединений на основе моделирования их акустической эмиссии / Е. Н. Лахова, В. В. Носов // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 3–14.

173. Труханов, В. М. Методика прогнозирования и расчета ресурса сложных систем / В. М. Труханов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 5. – С. 46–52.

174. Смирнов, А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 244 с.

175. Супонько, К. Л. Оценка потенциала долговечности (остаточного ресурса и срока службы) технических устройств / К. Л. Супонько // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 7. – С. 18–20.

176. Комаровский, А. А. Прогнозирование остаточного ресурса и долговечности / А. А. Комаровский // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 12. – С. 8–12.

177. ТТ 32.695-2006. Детали литые из низколегированной стали для вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Рама боковая и балка надрессорная – М. : ОАО «РЖД», 2006. – 32 с.

178. Памятка осмотрищику грузовых вагонов. – М. : ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2009. – 78 с.

179. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации. – М. : ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2009. – 128 с.

180. РД 32.052–2009. Ремонт тележек грузовых вагонов. – М. : ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2009. – 128 с.

181. ТИ ЦДРВ-32-002–2008. Инструкция по неразрушающему контролю литых деталей тележки грузовых вагонов модели 18-100 при продлении срока службы. – М. : ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2008. – 48 с.

182. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходные). – М. : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. – 224 с.

183. ОСТ 32.183–2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия. – М. : МПС, 2001. – 22 с.

184. *Попов, О. Н.* Оценка адекватности характеристик напряженно-деформированного состояния стеновой и эксплуатационной форм нагружения боковой рамы тележки грузового вагона / О. Н. Попов // Наука и техника транспорта. – 2007. – № 1. – С. 14–18.

185. *Степанова, Л. Н.* Быстродействующая микропроцессорная тензометрическая система для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев и др. // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 7. – С. 6–14.

186. *Серьезнов, А. Н.* Тензометрия в транспортном машиностроении / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов и др. – Новосибирск : Наука, 2014. – 272 с.

187. *Блохин, Е. П.* Динамические качества грузовых вагонов, имеющих тележки с диагональными связями / Е. П. Блохин [и др.] // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 5 (176). – Частина 1. – С. 12–15.

188. *Степанова, Л. Н.* Анализ погрешностей измерения вертикальных сил, действующих на рельс от колес движущегося транспортного средства / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. С. Кочетков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 53–57.

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

190. ЦП-774. Инструкция по текущему содержанию пути. – М. : МПС, 2000. – 240 с.

191. *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.

192. *Пастухов, И. Ф.* О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей / И. Ф. Пастухов, М. И. Пастухов // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3 (50). – С. 11–18.

193. *Палаткина, Л. В.* Исследование природы дефектов металла боковой рамы грузового вагона / Л. В. Палаткина, Н. В. Зюбан, Ю. В. Гребнев, О. В. Полякова // Черные металлы. – 2014. – № 7. – С. 26–29.

194. Исследование прочности боковой рамы телеги грузового вагона методом конечных элементов / Г. Г. Алушаева, С. Т. Дузельбаев, А. С. Омарбекова // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития – 2013 : сб. науч. тр. SWorld. Mat. Междунар. науч.-практ. конф. – Вып. 3. Т. 2. – Одесса : Черноморье, 2013. – С. 66–69.

195. Орлова, А. М. О возможности классификации литейных дефектов и зон повышенной ответственности в литых деталях тележек / А. М. Орлова, И. В. Сухих, И. В. Забадыкин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 44–47.

196. Бехер, С. А. Анализ результатов неразрушающего контроля при депо-ском ремонте деталей тележек грузовых вагонов / С. А. Бехер, А. Л. Бобров, А. А. Большанов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 20–26.

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

198. Волченко, В. Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции / В. Н. Волченко. – М. : Metallurgia, 1979. – 88 с.

199. Рауба, А. А. Исследование влияния геометрических параметров поверхностей трения на износостойкость тяжелонагруженных деталей тележки грузового вагона / А. А. Рауба, Д. В. Муравьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 4. – С. 50–59.

200. Гурвич, А. К. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 1: Общие вопросы. Контроль проникающими веществами / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов, С. Г. Сажин ; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1992. – 242 с.

201. Статистические методы обеспечения качества / Х.-Й. Миттаг, Х. Ринне: Пер. с нем. – М. : Машиностроение, 1995. – 616 с.

202. 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.

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

204. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справ. / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1987. – 1372 с.

205. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч.1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.

206. Бобров, А. Л. Повышение достоверности неразрушающего контроля литых деталей тележки грузовых вагонов : автореф. ... канд. техн. наук : 05.02.11 / Бобров А. Л. – Новосибирск, 2000. – 16 с.

207. Стрижало, В. А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / А. В. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В.А. Стрельченко и др. Киев : Наукова думка, 1990. – 232 с.

208. Трипалин, А. С. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты / А. С. Трипалин, С. И. Буйло. – Ростов н/Д : Изд-во РГУ, 1986. – 160 с.

209. Панин, В. Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1990. 255 с.

210. Башков, О. В. Анализ эволюции дефектной структуры поликристаллических материалов на различных стадиях нагружения методом акустической эмиссии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09 / БАШКОВ ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ. – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 16 с.

211. Пат. 2442155 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе сварки и устройство для его осуществления / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, К. В. Канифадин. – 2009146635/28 ; заявл. 15.12.2009 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. – 15 с.

212. Пат. 2472145 РФ. Устройство для акустико-эмиссионного контроля композиционных материалов / Е. В. Королев, В. А. Смирнов. – 2011138975/28 ; заявл. 23.09.2011 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 7 с.

213. Буденков, Г. А. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая. – М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2004, 136 с.

214. Пестриков, В.М. Механика разрушения. Курс лекций / Пестриков В.М., Морозов Е.М. – Спб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.

215. *Быков, С. П.* О достоверности акустико-эмиссионного контроля / С. П. Быков, Б. Ф. Юрайдо, В. И. Иванов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 53–60.

216. *Сморodinский, Я. Г.* Физические основы акустического контроля намагниченных и анизотропных сред. автореф. ... докт. техн. наук : 05.02.11 / Смородинский Я. Г. – С-Пб, 2004. – 42 с.

217. *Ринкевич, А. Б.* Физические основы и методы акустического контроля / А. Б. Ринкевич, Я. Г. Смородинский, Ю. А. Гулло. – Екатеринбург: Росс. акад. наук, Уральское отд-ние, Ин-т физики металлов, 132 с.

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

219. *Носов В. В.* Методика определения информативных параметров акустической эмиссии / В. В. Носов // Дефектоскопия. – 1998. – № 5. – С. 91-98.

220. *Носов В. В.* Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основа эффективности неразрушающего контроля / В. В. Носов // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 3 (65) – С. 7-13.

221. *Носов В. В.* Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций / В. В. Носов // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 61-72.

222. *Башков О.В.* Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В. и др. / Отв. ред. Семашко Н.А. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 301 с.

223. *Махутов Н. А.* Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н. А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.

224. *Фридман, Я. Б.* Механические свойства металлов: в 2 ч. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 368 с.

225. *Мешков, Ю. Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю. Я. Мешков. – Киев : Наукова думка, 1981. – 240 с.
226. *Бобров, А. Л.* Исследования параметров АЭ в образцах из низколегированной стали при статическом напряжении // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Одесса : Изд-во С. В. Куприенко, – Т. 7. – № 3. – С. 31–37.
227. *Бобров, А. Л.* Анализ изменений динамических характеристик источников акустической эмиссии при статическом нагружении металлических образцов / А. Л. Бобров // Дефектоскопия. – 2009. – № 5. – С. 18–24.
228. *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.
229. *Мельников, Д. В.* Методика определения величины прироста трещины в титановых сплавах при испытании на внецентренное растяжение / Д. В. Мельников // Принципы и процессы создания неорганических материалов. Вторые Самсоновские чтения. – Хабаровск, 2002. – С. 57–58.
230. *Серьезнов, А. В.* Экспериментальное установление связи спектра сигнала АЭ с длиной усталостной трещины в стальных образцах / А. Н. Серьезнов [и др.] // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 73–78.
231. *Серьезнов, А. Н.* Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических объектах / А. Н. Серьезнов [и др.] // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 2. – С. 5–8.
232. *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.
233. *Тушинский, Л. И.* Структура перлита и конструктивная прочность стали / Л. И. Тушинский, А. А. Батаев, Л. Б. Тихомирова. – Новосибирск : ВО «Наука». Сиб. изд. фирма, 1993. – 280 с.

234. *Степанова, Л. Н.* Исследования основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ / Л. Н. Степанова [и др.] // Деформация и разрушение. – 2014. – № 6. – С. 41–47.

235. *Верескун, В. Д.* Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележки грузового вагона / В. Д. Верескун. [и др.] // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта : сб. тр. / под. ред. Б. М. Лapidуса. – М. : Интекст, 2013. – С. 78–84.

236. *Бирюков, И. В.* Механическая часть тягового подвижного состава : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др. – М. : Транспорт, 1992. – 440 с.

237. Пат. 2299429 РФ. Способ контроля качества установки акустических преобразователей на металлическую конструкцию и устройство для его осуществления / А. Н. Серьезнов [и др.] – заявл. 03.05.2005 ; опубл. 20.05.2007, Бюл. № 14. – 12 с.

238. *Степанова, Л. Н.* Исследование образцов из материала боковых рам коробчатого сечения методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова [и др.] // Дефектоскопия. – 2013. – № 4. – С. 40–51.

239. *Бехер, С. А.* Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учеб. пособие / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2008. – 116 с.

240. *Бобров, А. Л.* Использование времени нарастания сигналов в качестве информативного параметра при акустико-эмиссионном контроле технических объектов транспорта / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2011 : сб. науч. тр. SWorld. Мат. Междунар. науч.-практ. конф. – Вып. 4. – Т. 2. – Одесса : Черноморье, 2011. С. 30–34.

241. *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.

242. *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.

243. *Ермолов, И. Н.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии / И. Н. Ермолов. – М. : НПЦ ЭХО+, 2004. – 109 с.

244. *Крауткремер, Й.* Ультразвуковой контроль материалов : справ. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М. : Metallurgiya, 1991. – 752 с.

245. *Наконечная, О. А.* Методы и алгоритмы локации источников акустической эмиссии / О. А. Наконечная // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2009. – № 73. – С. 111–115.

246. *Elforjani M., Mba D.* Defecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a slow rotating thrust bearing with acoustic emission // Insight, Vol. 50, № 5, May 2008, p. 264–268.

247. *Scholey J. J., et al.* A generic technique for acoustic emission source location // J. Acoustic Emission, Vol. 27, 2009, p. 291–298.

248. *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, г. Новосибирск, 7–11 июля 2008 г. – Новосибирск, 2009. – Т. 2 : Машиноведение. – С. 248–252.

249. *Добровидов, А. В.* Непараметрическое оценивание сигналов / А. В. Добровидов, Г. М. Кошкин. – М., 1997. – 329 с.

250. *Гришин, Ю. П.* Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.

251. *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.

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

253. *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 СГУПС, 2014. – С. 267–268.

254. Пат. 2431139 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением и устройство для его осуществления / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28. – 10 с.

255. Пат. 2150698 РФ. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство для контроля изделий / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. – опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. – 9 с.

256. Пат. 2226272 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля и диагностирования резервуаров для хранения сжиженных газов / В. И. Тарасенко, Б. Г. Ким, В. Н. Румянцев, А. В. Гришин. опубл. 27.03.2004, Бюл. № 9. – 11 с.

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

258. *Муравьев, В. В.* 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 СГУПС, 2001. – С. 399–401.

259. *Муравьев, В. В.* 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.

260. *Бобров, А. Л.* К оценке дефектности литых деталей подвижного состава / Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе. Кадровое и научно-техническое обеспечение процессов интеграции в мировую транспортную систе-

му : тез. докладов Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2007. – С. 154–155.

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

262. *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.

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

264. *Степанова, Л. Н.* 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.

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

266. *Муравьев, В. В.* 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.

267. РД 32.159 – 2000. Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. – М. : МПС РФ, 2000. – 73 с.

268. РД 32.149 – 2000. Феррозондовый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. – М. : МПС РФ, 2000. – 110 с.

269. РД 32.150 – 2000. Вихретоковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. – М. : МПС РФ, 2000. – 69 с.

270. Методика акустико-эмиссионного контроля (диагностирования) боковых рам и надрессорных балок тележек модели 18-100: ПКБ ЦВ № 682-2005, Утв. ОАО «РЖД», 19.07.2005. – М. : ПКБ ЦВ, 2005. – 48 с.

271. *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 СГУПС, 2016+. – с. 188-189.

272. *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.

273. *Бобров А. Л.* Идентификация типов дефектов и стадии их развития при акустико-эмиссионной диагностике металлических 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.

274. *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.

275. *Муравьев, В. В.* Сравнительная достоверность акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов / В. В. Муравьев // *В мире неразрушающего контроля.* – 2014. – № 3 (65). – С. 30–33.

276. Пат. РФ 2537747. Акустико-эмиссионный способ диагностирования металлических конструкций / Л. Н. Степанова, С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 14 с.

277. Пат. РФ № 2361199, МПК G01N 29/14. Способ прогнозирования остаточного ресурса металлических изделий / Бобров А. Л. – опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19. – 11 с.

278. *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.

279. *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.

280. *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., посвящ. 60-летию проф. А. Н. Смирнова ; под ред. В. Ю. Блюменштейна, А. А. Кречетова. – Кемерово, 2007. – С. 240–247.

281. *Трощенко, В. Т.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало и др. – Киев : Логос, 2000. – 571 с.

282. *Горицкий, В. М.* Диагностика металлов / В. М. Горицкий. – М. : Металлургиздат, 2004. – 408 с.

283. *Доронин, С. В.* Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем / С. В. Доронин, А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, Ю. И. Шокин. – Новосибирск : Наука, 2005. – 250 с.

284. *Степнов, М. Н.* Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций / М. Н. Степнов. – Новосибирск : Наука, 2005. – 342 с.

285. *Терентьев, В. Ф.* Циклическая прочность металлических материалов / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.

286. *Коллакот, Р.* Диагностика повреждений: пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 512 с.

287. *Орлов, А. И.* Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты : учеб. пособие / А. И. Орлов. – М. : МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.

288. *Острейковский, В. А.* Теория надежности / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
289. *Трощенко, В. Т.* Усталость и неупругость металлов / В. Т. Трощенко. – Киев : Наукова думка, 1971. – 268 с.
290. *Пестриков, В. М.* Механика разрушения твердых тел : курс лекций / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
291. *Матвиенко, Ю. Г.* Модели и критерии механики разрушения / Ю. Г. Матвиенко. – М. : Физматлит, 2006. – 328 с.
292. Пат. РФ № 2448343. Способ прогнозирования остаточного ресурса металлических изделий и устройство для его осуществления / А. Л. Бобров и др. опубли. 20.04.2012, Бюл. № 11. – 13 с.
293. *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 СГУПС, 28–29 нояб. 2012 г. – Ч. 2. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2012. – С. 40–46.
294. *Бобров, А. Л.* Методика определения остаточного ресурса литых деталей подвижного состава / А.Л, Бобров // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2011 : сб. науч. тр. SWorld. Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. – Вып. 4. – Т. 2. – Одесса : Черноморье, 2011. С. 30–34.
295. *Бобров, А. Л.* Реализация способов распознавания источников акустической эмиссии при контроле деталей подвижного состава / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : тез. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2012. – С. 346.
296. *Степанова, Л. Н.* Использование метода акустической эмиссии для повышения достоверности оценки технического состояния боковых рам / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров и др. // Проблемы транспортной механики : сб. тр. научных школ факультета "Управление транспортно-технологическими комплек-

сами" СГУПС. Факультет "Управление транспортно-технологическими комплексами" (СДМ) СГУПС ; отв. редактор В. А. Каргин. – 2014. – С. 149–161.

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

298. *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.

299. *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. Голова. Омск. – 2013. С. 188–193.

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора –  
 Директор Новосибирского  
 представительства АО «Вагонная  
 ремонтная компания -1»



С.А. Грассман  
 2016 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Методологические аспекты акустико-эмиссионной диагностики литых деталей сложной формы»  
 на соискание ученой степени доктора технических наук  
 Боброва Алексея Леонидовича

Комиссия в составе: председатель ревизор по безопасности движения поездов Новосибирского представительства АО «ВРК-1» А. А. Большанов, члены комиссии: мастер участка неразрушающего контроля вагонного ремонтного депо Омск-Сортировочный С. В. Вебер, мастер участка неразрушающего контроля вагонного ремонтного депо Ленинск-Кузнецкий М. А. Ильина составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Боброва А.Л. «Методологические аспекты акустико-эмиссионной диагностики литых деталей сложной формы» были использованы при внедрении и эксплуатации 13 комплексов акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов на предприятиях АО «Вагонная ремонтная компания -1». Применения методики акустико-эмиссионного контроля литых деталей позволило проводить:

- контроль состояния участков с литейными дефектами;
- контроль состояния деталей и оценка их ремонтпригодности после аварий;
- контроль состояния деталей отремонтированных сваркой;
- контроль с целью продления срока службы деталей, выработавших установленный нормативный срок эксплуатации.

Методики акустико-эмиссионного контроля были использованы в технологических процессах неразрушающего контроля литых деталей тележек грузовых вагонов с 2004 года на вагоноремонтных предприятиях ОАО «Центральной дирекции по ремонту вагонов» и АО «ВРК-1».

Использование указанных результатов позволяет повысить качество неразрушающего контроля литых деталей тележек грузовых вагонов на вагоноремонтных предприятиях. За период эксплуатации комплексов и методик акустико-эмиссионного контроля ежегодно контролировалось более 5 тысяч боковых рам и надрессорных балок, что привело к предотвращению выхода из строя литых деталей с дефектами, не обнаруживаемыми другими методами контроля.

Председатель комиссии

А. А. Большанов

Члены комиссии:

С. В. Вебер

М. А. Ильина

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Методологические аспекты акустико-эмиссионной диагностики литых деталей сложной формы»  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
Боброва Алексея Леонидовича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Боброва Алексея Леонидовича «Методологические аспекты акустико-эмиссионной диагностики литых деталей сложной формы» были внедрены для проведения акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек модели 18-100 на вагоноремонтном предприятии ВЧДр Новокузнецк-Сортировочный структурном подразделении АО «Вагонная ремонтная компания-2».

Вид внедренных результатов: комплекс акустико-эмиссионного контроля, программное обеспечение, «Технологическая инструкция по проведению акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов».

Объем внедрения: комплекс и методики контроля литых деталей тележек грузовых вагонов были применены для продления срока службы литых деталей тележек грузовых вагонов на основании ТИ ЦДРВ 32.002-2008 «Инструкции по неразрушающему контролю литых деталей тележек грузовых вагонов модели 18-100 при продлении срока службы», а также для контроля боковых рам и надрессорных балок при ремонте вагонов имевших сход на основании телеграфного указания ОАО «РЖД» № 3929 от 10.03.2009 г.

Начальник вагонного ремонтного депо  
Новокузнецк-Сортировочный  
АО «ВРК-2»



А.Г. Тарабрин

« 13 » \_\_\_\_\_ 02 \_\_\_\_\_ 2017 г.



**Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина»  
(ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»)**

Ползунова ул., д. 21, г. Новосибирск, 630051  
Тел. (383) 279-01-56  
Факс (383) 227-88-77  
E-mail: sibnia@sibnia.ru, http://www.sibnia.ru

ОКПО 07541511, ОГРН 1025400530836, ИНН/КПП 5401101598/540101001  
р/с 40502810944080100010 в Сибирском банке СБ РФ г. Новосибирск  
к/с 30101810500000000641  
БИК 045004641

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ФГУП «СибНИА  
им. С.А. Чаплыгина»

*В.Е. Барсук*  
Барсук В.Е.

М.П.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**А К Т**

внедрения

Комиссия в составе: председатель\_Оспенников В.В., члены комиссии: Степанова Л.Н., Кабанов С.И. составили настоящий акт о том, что в программном обеспечении акустико-эмиссионной системы СЦАД-16.03, используемой для проведения контроля литых деталей тележек грузовых вагонов, при обработке результатов контроля и идентификации источников акустической эмиссии на участках литых деталей, отремонтированных сваркой и наплавкой, были скорректированы критерии оценки степени опасности дефектов, полученные к.т.н., доцентом Бобровым А.Л. в рамках диссертационной работы «Методологические аспекты акустико-эмиссионного контроля литых деталей сложной формы».

По результатам испытаний методики акустико-эмиссионного контроля боковых рам и наддресорных балок тележек грузовых вагонов модели 18-100 была утверждена «Технологическая инструкция по проведению акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов», одним из соавторов которой был Бобров А.Л.

Председатель комиссии \_\_\_\_\_

*В.В. Оспенников*

В.В. Оспенников

Члены комиссии: \_\_\_\_\_

*Л.Н. Степанова*

Л.Н. Степанова

*С.И. Кабанов*

С.И. Кабанов