

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«МЭИ»**

На правах рукописи



Чернов Дмитрий Витальевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ УСТАЛОСТНЫХ
ТРЕЩИН С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Барат В.А.

Москва 2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Теоретические основы акустико-эмиссионного мониторинга усталостных дефектов	11
1.1 Актуальность применения акустико-эмиссионного метода в задачах контроля технологических устройств.....	11
1.2 Усталостное разрушение металлических материалов	17
1.3 Метод акустической эмиссии, как основа систем мониторинга технических устройств	24
1.3.1 Физические основы метода АЭ	24
1.3.2 Связь АЭ параметров с процессами разрушения	27
1.4 Мониторинг развития усталостных повреждений при помощи метода акустической эмиссии	32
1.5 Достоверность обнаружения источников АЭ	38
2 Материалы и методы исследования	42
2.1 Материалы и образцы.....	42
2.2 Испытательное оборудование	45
2.3 Методика проведения испытаний	46
2.4 Измерительная аппаратура	50
2.4.1 Регистрация потока АЭ данных	51
2.4.2 Определение акустических характеристик объекта контроля.....	54
2.4.3 Применение оптического метода НК	57
2.4.4 Исследование микроструктуры испытуемого материала.....	59
3 Исследование АЭ параметров, зарегистрированных на основных стадиях развития усталостных повреждений	62
3.1 Исследование кинетики развития дефекта при изменении параметров схемы нагружения.....	62
3.3 Анализ влияния максимального напряжения цикла, частоты циклов и R-отношения на средние значения АЭ параметров	69
3.4 Влияние ориентации усталостной трещины на параметры потока АЭ данных	71
3.5 Влияние структурных неоднородностей металла на параметры потока АЭ данных	77

3.5.1 Влияние неметаллических включений на результаты АЭ диагностики	78
3.5.2 Совместное влияние неметаллических включений и расслоений на результаты АЭ диагностики	80
3.5.3 Влияние расслоений на результаты АЭ диагностики	82
3.6 Исследование анизотропии акустических свойств металлических изделий	84
3.7 Выводы.....	86
4 Обнаружение и классификация УТ по результатам АЭ диагностики.....	87
4.1 Описание данных акустической эмиссии.....	87
4.2 Разработка алгоритма разделения стадий развития усталостных трещины	94
4.3 Оценка вероятности выявления усталостных трещин в зависимости от акустических свойств объекта контроля	99
4.4 Выводы.....	104
5 Построение статистической прогностической модели определения количества циклов до разрушения конструкции по данным АЭ	106
5.1 Разработка алгоритма фильтрации «вторичных» источников АЭ	106
5.2. Оптимальная фильтрация шумовых сигналов в АЭ контроле.....	114
5.3 Разработка регрессионной модели оценки количества циклов до разрушения объекта контроля	124
5.4 Методика оценки количества циклов до разрушения с использованием нейронных сетей	127
5.5 Выводы.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
Приложение А – Акт внедрения ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ».....	147
Приложение Б – Акт внедрения ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».....	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Эксплуатация опасных промышленных объектов сопряжена с риском возникновения аварийных ситуаций, приводящих к чрезвычайным ситуациям техногенного характера. Основной причиной их возникновения является серьезный износ основных производственных фондов, обусловленный в основном накоплением усталостных повреждений и появлением коррозии. Непредвиденный вывод оборудования из технологического процесса приводит к значительным финансовым потерям, связанным с ремонтными работами и простоем промышленных установок. Одним из наиболее распространенных примеров является деградация механических свойств вертикальных стальных резервуаров (РВС), приводящая к его разрушению и значительным экономическим потерям. Согласно [1] в экстремальных случаях общий материальный ущерб может превышать первичные затраты на сооружение в 500 раз и более. Таким образом, на сегодняшний день вопрос обеспечения безаварийной работы промышленного оборудования остается нерешенным.

Следует отметить, что решение поставленной задачи напрямую связано с изучением напряженно-деформированного состояния металла при помощи специализированных методов диагностики и расчетных задач на прочность. При этом уровень повреждаемости при эксплуатации технических устройств усиливается в локальных областях конструктивных особенностей с дефектами производственного, ремонтного и строительно-монтажного происхождения. Присутствующие в металле внутренние дефекты создают условия для ускоренного развития пластической деформации и формирования концентраторов напряжений, приводящих к снижению срока службы и повышению вероятности появления аварийной ситуации. В связи с этим существует практическая необходимость в разработке средств и

методик оценки состояния промышленных объектов, находящихся в эксплуатации.

В настоящее время для обеспечения безопасной эксплуатации технических устройств—используются методы неразрушающего контроля, например, вихретоковый, магнитный и ультразвуковой. Они позволяют выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты в конструкционных материалах. При этом указанные методы контроля требуют сканирования поверхности, и как следствие имеют ограничения при проведении диагностики большинства промышленных объектов в режиме реального времени. Одним из решений поставленной задачи является построение систем диагностического мониторинга, основанных на методе акустической эмиссии (АЭ). С его помощью возможно не только выявление активно развивающихся дефектов, но и классификация их по степени опасности разрушения контролируемого объекта. Однако существующие методики АЭ контроля требуют определенной схемы нагружения с превышением рабочего давления и неприменимы для режима мониторинга.

Для обеспечения качественных и достоверных результатов АЭ мониторинга опасных промышленных объектов необходимо применение современных систем измерения [2] и эффективных способов фильтрации шумовых сигналов, возникающих в процессе эксплуатации технических устройств. В зависимости от уровня зарегистрированных помех порог дискриминации акустических сигналов может достигать 70 дБ, что делает невозможным регистрацию полезных импульсов АЭ, соответствующих дефекту. При этом одной из основных задач является исследование параметров потока акустических сигналов, возникающих при развитии усталостных повреждений. Следует отметить, что большая часть существующих критериальных параметров и методик оценки состояния промышленных объектов разработана для таких эксплуатационных условий, при которых основное воздействие оказывает статическая нагрузка. Таким образом, для повышения достоверности АЭ мониторинга необходимо

внедрить дополнительные методики фильтрации шумовых сигналов и разработать актуальные критерии оценки состояния объекта контроля, согласующиеся с основными стадиями развития усталостных повреждений.

Цель работы и задачи исследования

Цель работы – Определение параметров АЭ сигналов, регистрируемых при развитии усталостных трещин на образцах трубной стали 09Г2С, и разработка эффективных методов фильтрации шумов в процессе АЭ мониторинга.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования параметров АЭ сигналов, регистрируемых в процессе роста усталостных трещин на образцах с надрезом.

2. Сопоставить кинетику развития усталостных трещин и параметров регистрируемых АЭ импульсов с учетом влияния режима нагружения и структурных особенностей исследуемых образцов.

3. Разработать алгоритм определения стадий развития усталостной трещины (УТ) в исследуемых образцах.

4. Разработать критериальные параметры, алгоритм и методику регистрации роста усталостных трещин при АЭ мониторинге образцов в условиях циклического нагружения.

5. С использованием критериальных параметров сигналов, регистрируемых при АЭ мониторинге, разработать математическую модель вероятностного прогноза развития УТ в зависимости от основных факторов, влияющих на процесс усталостного разрушения образцов трубной стали 09Г2С.

Методология и методы исследования

С целью построения математической модели развития усталостных трещин (УТ) на основании критериальных параметров акустических импульсов, регистрируемых в процессе АЭ мониторинга, проводились

циклические испытания плоских образцов с надрезом из конструкционной стали (09Г2С) на сервогидравлической установке Instron 8808. Параметры режима нагружения выбирались, исходя из условий эксплуатации реальных промышленных объектов [3]. Определение размеров усталостных трещин при их росте осуществлялось с применением специально разработанной эндоскопической видеокамеры. Подготовка образцов и проведение фрактографического анализа структуры усталостного разрушения образцов осуществлялось при помощи специализированного оборудования. При сопоставлении результатов АЭ мониторинга и кинетики роста трещины использовались методы статистического анализа данных.

Эксперименты по регистрации параметров шумовых сигналов выполнялись на реальных объектах нефтехимических предприятий. При исследовании АЭ сигналов и разработке способов фильтрации помех применялось специализированное программное обеспечение, а также методы цифровой обработки сигналов. В ходе разработки математической модели вероятностного прогноза развития УТ применялись как искусственные нейронные сети, так и линейные регрессионные модели.

Научная новизна работы

1. Экспериментально подтверждена взаимосвязь между критериальными параметрами накопленных «полезных» АЭ сигналов и стадиями развития усталостной трещины.
2. Проведена оценка влияния микроструктуры стали на динамику изменения АЭ параметров при развитии усталостной трещины
3. Разработана и апробирована математическая модель вероятностного прогноза усталостного разрушения образцов с надрезом из стали 09Г2С, основанная на технологии искусственных нейронных сетей.

Теоретическая ценность работы

Полученные результаты дополняют существующие теоретические и методологические разработки акустико-эмиссионного контроля развития усталостных трещин в элементах изделий, а также могут быть использованы

при разработке новых методик по обработке акустических сигналов для повышения выявляемости опасных источников акустической эмиссии. Часть приведенных в работе результатов включены в методическое пособие по курсу «Информационные технологии в приборостроении» кафедры Электротехники и электроники «НИУ «МЭИ».

Практическая ценность работы

1. Разработана методика, позволяющая регистрировать в процессе АЭ мониторинга рост УТ, включающая способы фильтрации сигналов помех, статистические и вероятностные подходы для регистрации процесса развития усталостной трещины.

2. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать процесс развития усталостной трещины по результатам АЭ мониторинга.

3. Разработан алгоритм фильтрации сигналов помех, в частности «вторичных» источников АЭ.

4. Разработан алгоритм разделения стадий стабильного и ускоренного роста усталостных трещин по результатам АЭ мониторинга.

Разработанные методики задействованы в интегральных системах АЭ мониторинга опасных промышленных объектов.

Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные методики фильтрации шумовых сигналов и определения стадии развития усталостных повреждений внедрены в программное обеспечение сбора и обработки АЭ данных ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», а также используются в обучающих программах кафедры Электротехники и электроники «НИУ «МЭИ»

Степень достоверности полученных результатов

Экспериментальные исследования по циклическому нагружению образцов из стали 09Г2С осуществлялись при помощи испытательного оборудования Instron 8808, прошедшего поверку 20.01.2016 г. Регистрация и обработка акустико-эмиссионных сигналов проводилась при помощи прибора

ALine32D, зарегистрированного в государственном реестре средств измерений. Обработка экспериментальных данных осуществлялась при помощи методов статистического анализа (дисперсионный и регрессионный анализ, нейронные сети). В теоретической части диссертационной работы использовались общеизвестные законы развития усталостных трещин (закон Пэриса, кинетическая диаграмма усталостного разрушения), достижения в области цифровой обработки сигналов (синтез фильтра Колмогорова-Винера) и результаты интеллектуальной деятельности в области акустической эмиссии (работы Иванова В.И., Степановой Л.Н., Ботвиной Л.Р., Мерсона Д.Л. и других).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

IV Международной научно-практической конференции «Акустическая эмиссия. Возможности метода в условиях современного риск-ориентированного подхода к обеспечению безопасности производственных и социально значимых объектов», Москва, 2014 год; XXII Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии», Москва 2014 год; XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 2016 год; XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 2017 год; XXIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 2018 год; Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ), Тольятти, 2018 год.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 3 – в журналах из перечня ВАК, 3 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 1 публикация в журнале, входящем в перечень РИНЦ, и 5 тезисов докладов научно-технических конференций.

Личный вклад автора

Проведение теоретических и экспериментальных исследований, выбор параметров схем нагружения, разработка способов фильтрации и математических моделей оценки состояния изделия, обработка, обобщение и анализ полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 135 страницах, содержит 66 рисунков, 13 таблиц и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 110 наименований и двух приложений.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Результаты исследования параметров АЭ сигналов, возникающих при усталостных испытаниях образцов из стали 09Г2С с различными режимами нагружения.

2. Способ фильтрации акустических сигналов, позволяющий выявить импульсы АЭ, соответствующие развитию магистральной трещины на фоне сигналов помех, в том числе вторичных источников.

3. Метод определения основных стадий накопления усталостных повреждений в режиме реального времени с помощью критериальных параметров акустических сигналов, регистрируемых в процессе АЭ мониторинга.

4. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать процесс развития усталостной трещины.

Связь диссертационной работы с грантами

Диссертационная работа выполнена при реализации Проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности № 11.9879.2017/8.9.

1 Теоретические основы акустико-эмиссионного мониторинга усталостных дефектов

1.1 Актуальность применения акустико-эмиссионного метода в задачах контроля технологических устройств

Основной задачей промышленной безопасности является предупреждение и минимизация риска возникновения аварийных ситуаций. Возникновение крупных происшествий не только приводит к выходу из строя промышленного оборудования, но и наносит непоправимый вред человеку и окружающей среде. Для решения поставленной задачи необходимо проводить внедрение как современных технологий [4, 5], так и новых методик для оценки состояния технических объектов [6, 7].

Несмотря на успехи в развитии техники, частота возникновения аварийных ситуаций лишь возрастает. Причинами являются различные факторы, например, технического, природного или организационного характера [8]. Чрезвычайные ситуации природного характера в основном связаны с воздействием погоды или катаклизмов (ураганы, штормы, землетрясения, лавины и др.), а к авариям организационного характера следует отнести производственную халатность и человеческий фактор.

Главной причиной возникновения аварийных ситуаций технического характера является ухудшение прочностных свойств промышленных объектов, находящихся в процессе эксплуатации. В работе [9] выделяют три основных механизма накопления повреждений: 1) усталостный, 2) коррозионный и 3) механизм, связанный с воздействием внешних сил. Стоит отметить, что наиболее распространенной причиной отказов промышленного оборудования является усталостное и коррозионное разрушение. Коррозионные повреждения возникают в основном в агрессивных средах, например, в нефти с высоким содержанием сероводорода [10]. Усталостные повреждения возникают во всех технических устройствах, при этом, чем выше срок эксплуатации объекта, тем выше вероятность их появления.

Подробное описание механизмов усталостного разрушения приведено в пункте 1.2.

В настоящее время 15% железнодорожных путей России нуждаются в ремонте, а средний возраст эксплуатируемых поездов составляет 20-25 лет. Согласно статистике в период с 1992 по 1999 год зарегистрировано 26 железнодорожных происшествий. При этом их количество неуклонно растет, и только за 2015 год зарегистрировано 32 инцидента. Необходимо отметить, что число аварийных ситуаций в аэрокосмической отрасли не уменьшается. Проблема катастроф на авиатранспорте усугубляется низким качеством контроля состояния авиационного парка, а также падением квалификации летного состава [11].

Современное состояние химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности России находится в плачевном состоянии. В настоящее время на предприятиях отмечается сильный износ производственных мощностей при высокой загруженности предприятий, низкая квалификация кадров, а также малый объем инноваций и инвестиций, необходимый для обновления технологической базы [12]. Перечисленные выше факторы не только снижают эффективность предприятий, но и повышают риск возникновения аварийных ситуаций. Например, 16 июня 2014 года на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) произошел взрыв газофракционирующей установки, в результате которого зарегистрировано возгорание площади 400 квадратных метров. Согласно отчету пожарно-технической экспертизы причиной возникновения аварийной ситуации является некачественно проведенный контроль состояния промышленного объекта. Весной 2008 года на территории НПЗ «Киннеф» произошел взрыв водородосодержащей смеси с последующим горением. Пожару был присвоен 3 класс сложности из 5, в результате которого погибли 5 человек. Согласно результатам проведенной экспертизы причиной аварии стал износ промышленного оборудования.

В настоящее время в эксплуатации находится огромное количество технических устройств, нормативный ресурс которых давно выработан. Их незамедлительный вывод из эксплуатации недопустим из-за возможной остановки большого числа предприятий или целой промышленной отрасли. Таким образом, актуальной задачей является поэтапное внедрение нового оборудования и продление срока эксплуатации старого путем периодического проведения неразрушающего контроля (НК) и внедрения в технологический процесс систем непрерывного мониторинга [13].

Одним из возможных решений задачи по разработке таких систем является применение физических методов НК. Их можно разделить на две большие группы – сканирующие и интегральные. К сканирующим методам можно отнести:

- 1) Капиллярный
- 2) Ультразвуковой
- 3) Магнитный
- 4) Радиационный

Капиллярный метод неразрушающего контроля основан на проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в поверхностные и сквозные дефекты. К его основным достоинствам можно отнести простоту проведения контроля и применимость к широкому спектру материалов [14]. К сожалению, сильное влияние на чувствительность метода оказывает качество поверхности объекта, ориентация дефекта и малая зона контроля.

Ультразвуковой метод НК (УЗК) основан на генерации и регистрации упругих колебаний при помощи пьезоэлектрического преобразователя. С его помощью в объект контроля излучается акустическая волна, которая взаимодействует со структурными неоднородностями и дефектами материала. Основным признаком их присутствия является уменьшение интенсивности (амплитуды) ультразвуковой волны, зарегистрированной приемным преобразователем. В настоящее время активно развиваются методы контроля с применением фазированных антенных решеток (ФАР).

Метод ФАР является одним из способов генерации упругих колебаний с использованием специализированных линий задержек, а с его помощью можно зарегистрировать множество А-сканов, преобразующихся в S-скан. При помощи УЗК выявляют различные виды повреждений, такие как нарушение сплошности, коррозия, а также трещины различных размеров и ориентации. Перечисленные выше достоинства и высокая чувствительность метода позволяют проводить контроль сварных соединений [15], металлических и композиционных материалов, объектов авиационной, химической и нефтегазовой отрасли. К основным недостаткам можно отнести сложность применения УЗК для крупнозернистых металлов и малую зону контроля, соизмеримую с геометрическими размерами приемного преобразователя.

Магнитный метод контроля основан на регистрации полей рассеяния вокруг дефектов в ферромагнитных материалах. Наибольшую популярность получил магнитопорошковый метод [16]. При его использовании на намагниченную деталь наносится магнитный порошок или суспензия. Частицы ферромагнитного порошка, попавшие под влияния полей рассеяния, притягиваются и оседают вблизи несплошностей. Основным достоинством метода является возможность обнаружения малых трещин с незначительным раскрытием. К недостаткам можно отнести влияние шероховатости поверхности на параметр чувствительности, а также малую область контроля.

Радиографический контроль (РК) основан на зависимости интенсивности рентгеновского излучения от физических свойств и состояния объекта. В основном он применяется при контроле сварных соединений для выявления пор, непроваров, инородных включений [17]. Высокая чувствительность метода позволяет определить не только несплошности, но и дефекты структурного уровня. К основным недостаткам относится зависимость чувствительности от ориентации и раскрытия дефекта, ограниченная зона контроля и опасность для персонала.

Исходя из перечисленных выше особенностей сканирующих методов НК, следует выделить один существенный недостаток – малая зона контроля, сопоставимая с геометрическими размерами первичных преобразователей. Для ультразвукового и магнитного методов область контроля может превышать 30 мм. При проведении радиационного контроля важными особенностями являются размеры фокусного пятна излучателя, энергия источника и качество пленки. В зависимости от параметров источника радиационная толщина объекта контроля достигает 100 мм. Проведение диагностики в ограниченной зоне не позволяет оценить работоспособность технического устройства в целом. Таким образом, использование сканирующих методов в качестве основы для разработки систем мониторинга, регистрирующих развитие усталостных повреждений, не представляется возможным. Их основной областью применения является контроль областей с повышенным уровнем локальных напряжений и подтверждение уже выявленных усталостных повреждений.

Для построения систем мониторинга опасных промышленных объектов необходимо использовать такие методы НК, в результате применения которых проводится интегральная оценка их состояния. К таким методам можно отнести:

- 1) Вибрационный
- 2) Тепловизионный
- 3) Акустико-эмиссионный

Зарождение и развитие усталостных повреждений приводит к изменениям параметров вибросигналов, регистрируемых в процессе контроля промышленного оборудования. Высокая чувствительность вибрационного метода НК позволяет выявлять даже незначительные повреждения, степень опасности которых определяется при помощи диагностических признаков [18]. Область применения этого метода обширна и включает в себя контроль турбоагрегатов, процессов теплового расширения турбин, вращающихся элементов промышленных агрегатов, а также

проведение балансировки подшипников и роторов. К сожалению, при всех своих достоинствах метод обладает существенными недостатками, к которым относится влияние шумовых процессов на информативность диагностических признаков, а также ограниченная область применения.

Следующим к рассмотрению выбран тепловизионный метод НК. Он основан на дистанционной регистрации температурного распределения поверхности объекта контроля. Результатом диагностики является термограмма, при помощи которой определяют аномальные изменения (как правило, повышение) температуры, связанные с присутствием усталостных повреждений. Высокая чувствительность метода позволяет обнаруживать дефекты даже на начальном этапе их развития. Несмотря на ряд неоспоримых преимуществ, таких как дистанционность, наглядность и оперативность [19], следует выделить основные недостатки:

1) Для проведения диагностики необходим полный доступ к поверхности объекта. Присутствие изоляции или иных барьеров приведет к снижению уровня достоверности результатов контроля;

2) Воздействие источников инфракрасного излучения, не связанных с объектом, так же приводит к искажению результатов.

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод НК основан на явлении генерации упругих волн при структурных изменениях материала, таких как возникновение и развитие усталостных трещин и коррозии. В качестве основного источника информации выступает акустический сигнал, регистрация которого осуществляется при помощи приемного преобразователя, соединенного с блоком сбора данных. В процессе обработки стандартных параметров, таких как амплитуда, длительность, время нарастания или время спада импульса АЭ, проводится расчет критериев, на основе которых оценивается степень опасности источника акустических сигналов. К основным достоинствам метода можно отнести высокую чувствительность, широкую область применения, а также возможность определения не только класса опасности, но и местоположения

дефекта. Недостатком является регистрация большого числа шумовых сигналов, осложняющих процедуру обработки [20, 21, 22].

В результате приведенного выше сравнительного анализа следует отметить, что наиболее оптимальным методом НК, на основе которого возможно построение систем мониторинга, является интегральный метод АЭ. Его использование возможно при контроле широкого спектра технических устройств, а существующие достоинства позволяют определять не только местоположение, но и класс опасности источников АЭ (усталостных и коррозионных повреждений). При этом использование сканирующих методов НК необходимо в качестве инструмента, подтверждающего зарегистрированные повреждения. Подробное описание метода АЭ представлено в пункте 1.3.

1.2 Усталостное разрушение металлических материалов

Детали и элементы конструкций опасных промышленных объектов ежедневно подвергаются циклическим нагрузкам, из-за чего актуальность проблемы усталостного разрушения с каждым днем неуклонно растет. Для повышения долговечности элементов технологических устройств используют специализированные металлы и сплавы, характеристики которых обеспечивают безаварийную работу объекта в условиях эксплуатационных нагрузок. При воздействии эксплуатационных нагрузок отмечается или повышение деформации, или рост уровня напряжений, приводящих к деградации и разрушению металлов. В зависимости от уровня приложенной нагрузки количество циклов до разрушения может варьироваться от нескольких единиц до значений свыше 10^{10} циклов.

Основным инструментом для анализа процессов усталостного разрушения является кривая усталости, предложенная Велером [23]. Кривая усталости представляет собой зависимость максимального напряжения цикла от числа циклов до разрушения (рис. 1.1).

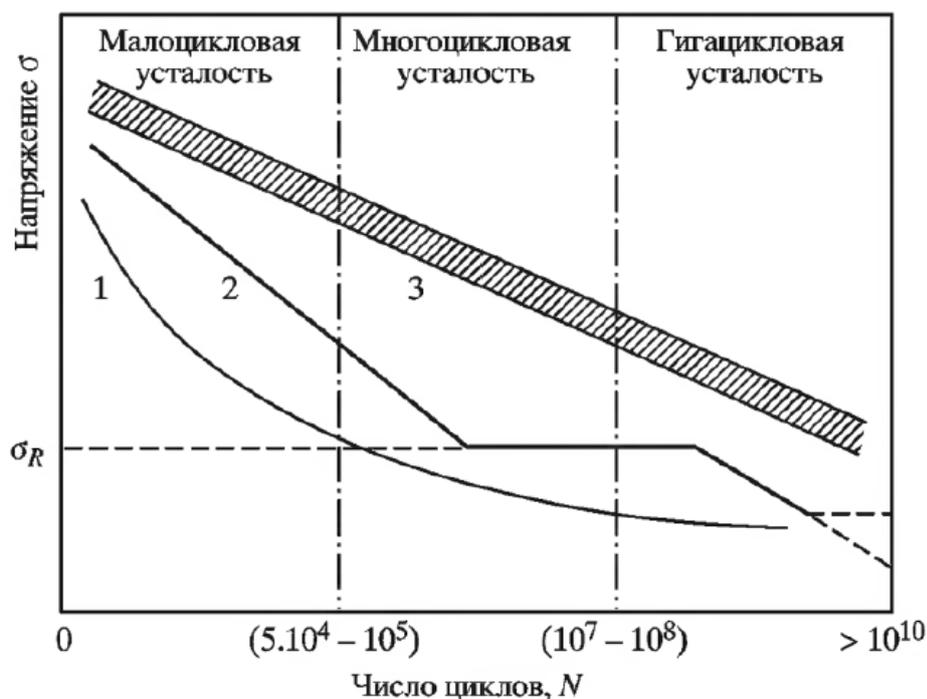


Рисунок 1.1 – Виды кривых усталости и основные области усталостного разрушения металлических материалов (схема) [24]

На рисунке 1.1 качественно представлены кривые усталости для различных видов металлических материалов. *Стандартной базой* для эксперимента по усталостному разрушению является испытание при помощи $10^7 - 10^8$ циклов. Если в рамках такого нагружения образец не разрушился, то на кривой усталости можно выделить горизонтальный участок (кривая 2, рис. 1.1). В этом случае говорят о *физическом пределе выносливости* σ_R по аналогии с физическим пределом текучести σ_T . У металлов, для которых не характерно появление физического предела выносливости, определяется предел ограниченной выносливости σ_{RN} – значение максимального напряжения цикла, соответствующее задаваемой долговечности (кривая 1, рис. 1.1). Необходимо отметить, что для высокопрочных и закаленных сталей зависимость $\sigma_R - \lg N$ имеет линейный характер (кривая 3, рис. 1.1). В этом случае так же определяется предел ограниченной выносливости σ_{RN} [25].

На рисунке 1.1 также показаны основные области усталостного разрушения: малоцикловая, многоцикловая и гигацикловая усталость. Согласно нормативным документам [26, 27] стандартная испытательная база

при малоцикловой усталости составляет $5 \cdot 10^4 - 10^5$ циклов, а при многоцикловой до 10^8 циклов. Область гигациклового усталости может превышать значение 10^{10} циклов, при этом в работе Н. А. Махутова [28] выделяется гиперусталостное (терацикловое) разрушение, при котором число циклов до разрушения может достигать 10^{12} . При описании процессов, возникающих при воздействии циклических нагрузок, следует обратить внимание как на абсолютные размеры усталостной трещины, так и на кинетику их развития. Для описания кинетики развития усталостных повреждений проводится построение зависимости скорости роста трещины (dl/dN) от размаха коэффициента интенсивности напряжений (рис. 1.2), где l – длина трещины, N – номер цикла нагружения.



Рисунок 1.2 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения [24]

При рассмотрении кинетической диаграммы усталостного разрушения необходимо выделить четыре основных стадии: 1) появление и развитие малых (коротких) усталостных трещин, 2) припороговый рост, 3) стабильный рост и 4) ускоренный рост усталостных трещин. Также следует отметить граничные значения КИН: K_{th} – пороговый размах КИН, ниже которого усталостная трещина не распространяется; K_{1-2} – граничное значение между припороговым и стабильным этапом развития дефекта; K_{2-3} – граничное

значение между стадиями стабильного и ускоренного роста усталостной трещины; K_{fc} – момент усталостного разрушения.

Малые усталостные трещины (МУТ) разделяют [29] на 4 класса:

- 1) Механически малые трещины
- 2) Микроструктурно-малые трещины
- 3) Физически малые трещины
- 4) Химически малые трещины

Процесс зарождения МУТ объясняется при помощи теории дислокаций [30]. В реальной структуре металла существует большое количество дефектов, разделение которых осуществляется по геометрическим признакам:

- 1) точечные – вакансии и атомы внедрения;
- 2) линейные – дислокации, дисклинации, цепочки вакансий и атомов внедрений;
- 3) поверхностные – границы зерен и двойников;
- 4) объемные – поры, включения, трещины и царапины.

Воздействие внешних сил может привести к необратимым изменениям в структуре материала, связанным с перемещением дислокаций (пластической деформацией) и образованием МУТ. В работах [31, 32] описана модель образования малых трещины внутри и на границе зерна (рис. 1.3).

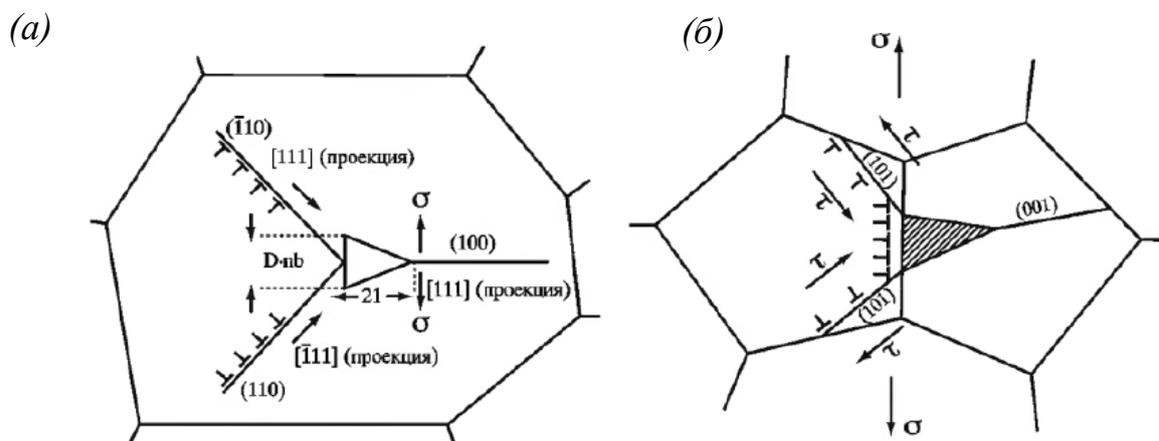


Рисунок 1.3 – Схема образования микротрещин по Коттреллу (а) внутри, (б) у границы зерна

На рисунке 1.3 (а) показан процесс зарождения микротрещины внутри зерна путем пересечения плоскостей скольжения, при этом образуется несплошность шириной $n \cdot b$ (n – количество дислокаций, b – вектор Бюргера), которая действует на кристалл как клин. Критическое напряжение, необходимое для зарождения такой трещины, рассчитывается по приведенной ниже формуле:

$$\sigma = 2\gamma/nb, \quad (1.1)$$

где γ – работа образования единицы свободной поверхности трещины.

В работе [33] отмечается, что процесс зарождения МУТ в аустенитных сталях возникает в области пересечения двойников и на границе зерен. При этом чем ниже максимальный уровень нагрузки цикла, тем выше вероятность возникновения МУТ на границе зерен.

Область зарождения и развития МУТ ограничена пороговым значением коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{th} (рис. 1.2), а кинетика их развития зависит от многих факторов, таких как напряженно-деформированное состояние, структура металла, эффект закрытия трещины и т.д. В работе [34] исследована зависимость между скоростью роста МУТ и структурой металла. Было отмечено, что структура металла напрямую влияет на параметр скорости – чем больше размер зерна, тем выше скорость распространения МУТ.

В работе [35] проведено сопоставление скоростей распространения МУТ в феррито-перлитной и феррито-бэйнитной микроструктурах. В обоих случаях зарождение и распространение трещины происходит в феррите, а её минимальное подрастание соответствует 30-70 мкм. При достижении дефектом более прочной структуры значение скорости распространения уменьшается, а дальнейшее развитие зависит от уровня локальных напряжений. Для описания процесса роста МУТ авторы предложили следующую модель:

$$\frac{da_s}{dN} = f \cdot \varphi, \quad (1.2)$$

где f – эмпирический коэффициент, описывающий размер зоны интенсивной пластической деформации, φ – перемещение вершины трещины.

При достижении размера трещины критического значения, при котором коэффициент интенсивности напряжений в её вершине превышает параметр K_{th} , говорят о наступлении припороговой стадии развития усталостной трещины (РУТ) (рис. 1.2, стадия 2). Её наступление характеризуется увеличением объема пластической деформации в вершине трещины, достигающего нескольких процентов от размера зерна.

Кинетика РУТ на стадии 2 зависит от множества факторов, таких как структура материала, эффект закрытия вершины усталостной трещины, режимы нагружения и т.д. В работах [36, 37] описано сильное влияние коэффициента асимметрии цикла R на припороговую скорость РУТ. Авторы поясняют, что причиной такой закономерности является эффект закрытия трещины под влиянием окисления, которое усиливается с уменьшением R . Когда процесс окисления отсутствует влияние параметра R на припороговые характеристики РУТ уменьшается.

Для оценки скорости РУТ авторы работы [38] провели серию экспериментов на образцах из крупнозернистого сплава Fe-3%Si. В результате проведенного исследования было установлено, что скорость РУТ v на стадии 1 связана с размером зоны интенсивной пластической деформации η соотношением:

$$v = 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot (2\eta)^{1,5}, \quad (1.3)$$

где $\eta \ll d$, d – размер зерна.

Для описания закономерностей РУТ на 3-ей стадии в основном применяется формула Пэриса (1.4) [39]. Также на этой стадии выделяют промежуточные критерии трещиностойкости K_{I_s} и K_a . Критерий K_{I_s} характеризует переход от квазиупругого к упругопластическому характеру роста трещины, а критерий K_a определяет начало ускоренного роста трещины, связанного с возрастанием деформации в пластической зоне вершины трещины.

$$v = C \cdot (\Delta K)^n, \quad (1.4)$$

где C – постоянная величина, n – показатель степени, ΔK – размах КИН, соответствующий размаху нагрузки в цикле.

Приведенная выше формула не является универсальной в связи с чем на её основе было разработано множество критериев, учитывающих влияние различных факторов.

В работе [40] автором предложена зависимость, учитывающая влияние коэффициента асимметрии цикла ($R = K_{max} / K_{min}$):

$$\frac{dl}{dN} = CK_{max}^{n_1} \Delta K^{n_2}, \quad (1.5)$$

где C , n_1 и n_2 – постоянные материала

Еще одним фактором, влияние которого необходимо учитывать при исследовании процесса РУТ, является эффект закрытия трещины. Для решения поставленной задачи Элбером [41] была разработана следующая зависимость:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n, \quad (1.6)$$

где $\Delta K_{eff} = u\Delta K$, $u = \sigma_{max}\sigma_{op} / \sigma_{max}\sigma_{min}$, σ_{op} – напряжение, при котором происходит открытие трещины

При достижении КИН значения K_{2-3} (рис.1.2) говорят о наступлении стадии ускоренного РУТ. Распространение трещины на этой стадии в основном связано с микро- и макромеханизмами разрушения, а размер пластической зоны значительно превышает размер зерна.

В работе [42] описан критерий для области перехода от 3-ей к 4-ой стадии РУТ, учитывающий влияние асимметрии цикла нагружения.

$$\frac{dl}{dN} = C \frac{\Delta K^n \cdot K_{max}}{K_{max} - K_{max}}, \quad (1.7)$$

Для описания РУТ на этапе ускоренного развития Яремой [43] была предложена следующая зависимость:

$$\frac{dl}{dN} = C \left(\frac{K_{max} - K_{th}}{K_c - K_{max}} \right)^n, \quad (1.8)$$

где K_{th} - пороговое значение КИН.

Завершение 4-ой стадии характеризуется переходом к окончательному разрушению материал (долому), при котором регистрируется высокий уровень деформации (вытяжка).

Далее рассматриваются способы анализа и регистрации процессов возникновения и развития усталостных повреждений при помощи физических методов неразрушающего контроля.

1.3 Метод акустической эмиссии, как основа систем мониторинга технических устройств

Акустическая эмиссия (АЭ) – физическое явление, связанное с излучением упругих волн исследуемым объектом при нелинейных трансформациях его структуры [20]. А. Ф. Иоффе и М. В. Классен обнаружили возникновение шумов при деформировании нагретых кристаллов каменной соли и цинка, указав на зависимость между частотой возникновения акустических сигналов и уровнем приложенной нагрузки. Первые работы по систематическому исследованию шумов, возникающих при деформации материалов, были проведены Д. Кайзером. Он показал, что акустический шум при деформации обнаруживается у большого числа материалов даже на ранних стадиях нагружения [44]. Большой вклад в развитие акустической эмиссии внесли российские ученые В. И. Иванов, В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот, В. М. Баранов, Г. Б. Муравин и др. Из зарубежных исследователей, прежде всего, необходимо выделить работы Н. L. Dunegan, К. Ono, М. Otsu, С. В. Scruby, М. С. Forde и др.

1.3.1 Физические основы метода АЭ

В настоящее время метод акустической эмиссии является одним из наиболее распространенных и широко развиваемых методов неразрушающего контроля. Он применяется в различных отраслях

промышленности для проведения неразрушающего контроля и исследования технологических процессов.

При описании возникновения АЭ сигналов необходимо рассмотреть схему развития трещины в двумерной структуре, подверженной воздействию внешних сил (рис. 1.4).

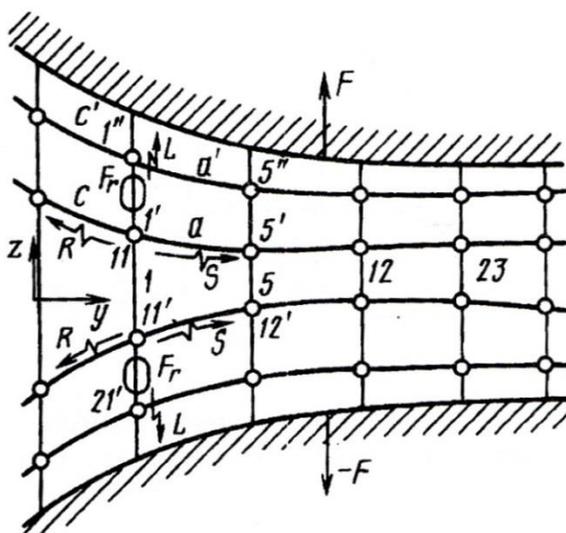


Рисунок 1.4 – Схема развития разрушения атомной решетки в двумерной структуре [20]

На рисунке 1.4 показана схема развития разрушения при воздействии внешней растягивающей силы F . Прямые линии обозначают атомные связи, а развитие трещины протекает слева направо. При воздействии силы F наблюдается деформация решетки, при которой в атомных связях накапливается упругая энергия. При достижении критического значения деформации происходит разрыв атомной связи, характеризующийся релаксацией (высвобождением) энергии в виде продольных (L), поперечных (S) и рэлеевских (R) волн. Взаимодействие этих волн формирует АЭ сигнал. При этом, чем больше уровень накопленных повреждений (количества разорванных связей), тем больше энергии высвобождается в виде акустического излучения.

В настоящее время метод АЭ применяется для решения большого количества научно-технических проблем, часть из которых представлены ниже:

1) Исследование физических процессов, сопровождение механических испытаний, исследование процесса релаксации напряжений, уточнение механизмов деформации;

2) Контроль состояния объектов – обнаружение и оценка опасности возникающих трещин, коррозии, расслоений, обнаружение утечек и другие.

Такое широкое распространение метод получил благодаря своим достоинствам [20, 45]:

1) *Интегральность* – возможность проведения контроля объекта в целом путем установки на его поверхность одного или нескольких преобразователей. Например, в работе [46] для проведения АЭ контроля участка нефтепровода применялась 24-х канальная система сбора данных, а расстояние между соседними преобразователями не превышало 60 метров. В ходе контроля авторами была выявлена течь и очаги язвенной коррозии, подтвержденные визуально-измерительным методом НК.

2) *Высокая чувствительность*. По расчетным оценкам предельная чувствительность аппаратуры АЭ составляет порядка $1 \cdot 10^{(-6)}$ мм², что для трещины протяженностью 1 мкм соответствует выявлению скачка в 1 мкм. В условиях промышленного контроля уровень шума выше, чем в лаборатории, что приводит к снижению чувствительности. На практике метод АЭ позволяет выявить приращение трещины порядка десятых долей миллиметра, что невозможно выполнить ни одним из традиционных методов НК [20, 47].

3) *Возможность контроля различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материала в реальном времени*, например, процессов сварки, твердения бетона, расслоения композиционных материалов и др. Авторы работы [48, 49] применяли метод АЭ для оценки качества сварки. В ходе эксперимента проводилась сварка двух листов

корабельной стали со вставками из тугоплавких материалов, моделирующих непровары. При помощи метода АЭ удалось не только выявить характерную форму акустических сигналов от дефекта, но и определить его местоположение. Также метод применяется при контроле процессов твердения бетона [50], резки [51], спекания [52] и других.

4) *Возможность проведение контроля в реальном масштабе времени*, что позволяет предотвратить разрушение технических устройств в процессе эксплуатации [53, 54, 55].

К основным недостаткам метода можно отнести:

1) Необходимость нагружения объекта, поскольку только при этом условии возможна инициация процесса развития повреждений и возникновение акустических сигналов

2) Высокая чувствительность к электромагнитным, климатическим, акустическим, вибрационным и прочим шумам. Для уменьшения влияния шума, обусловленного, например, соударением или трением подвижных частей объекта контроля, применяются специальные методики фильтрации [56, 57, 58, 59, 60].

1.3.2 Связь АЭ параметров с процессами разрушения

Результатом применения метода АЭ является оценка класса опасности источников акустических сигналов. Согласно нормативным документам [20, 21] разделяют четыре класса опасности:

- 1) Пассивный
- 2) Активный
- 3) Критически активный
- 4) Катастрофически активный

Классификация источников в большинстве случаев проводится с использованием первичных параметров акустического сигнала, таких как суммарный счет, число импульсов, амплитуда (амплитудное распределение), активность, энергия и другие [21, 22]. Амплитуда АЭ сигналов является одним из основных параметров, связанных с процессом разрушения.

Авторами [61] была разработана модель, описывающая зависимость между плотностью подвижных дислокаций (ρ_m) и объединенным параметром АЭ (Λ), расчет которого проводится по приведенной ниже формуле:

$$\Lambda = \sum_m u_m N_i, \quad (1.9)$$

где N_i – число скачков с амплитудой u_m ; m – число принятых уровней дискриминации. На основе экспериментов по статическому растяжению образцов из стали 10ГН2МФА и 10 [20] было получено выражение, связывающее среднеквадратичное значение амплитуды (\bar{u}), величину пластической деформации (ε_p) и скорость деформирования ($\dot{\varepsilon}$):

$$\bar{u} = k_0 \sqrt{\dot{\varepsilon}} e^{-d\varepsilon_p}, \quad (1.10)$$

где k_0 и d – константы эксперимента.

Амплитуда импульса АЭ так же применяется при расчете критериальных оценок состояния объектов. Одним из наиболее распространенных способов классификации источников является *амплитудный критерий* [21]. Для его применения необходимо выполнить два условия:

- 1) Восстановить амплитуду импульсов АЭ вблизи источника, используя его координаты и значение коэффициента затухания;
- 2) Провести предварительные испытания, в результате которых определить граничное значение допустимой амплитуды A_r .

Классификация источников по амплитудному критерию осуществляется по приведенной ниже таблице [20]:

Таблица 1.1. Классификация источников АЭ по амплитудному признаку

Класс источника АЭ	Признаки формирования класса
I класс	Источник, для которого не проводилось вычисление средней амплитуды (A_{cp}) импульсов (получено менее трех импульсов за интервал наблюдения)

Продолжение таблицы 1.1

II класс	Источник, для которого выполняется неравенство $A_{cp} < A_t$
III класс	Источник, для которого выполняется неравенство $A_{cp} > A_t$
IV класс	Источник, включающий не менее трех зарегистрированных импульсов, для которых выполняется неравенство $A_{cp} > A_t$

Авторы исследовательских работ [62, 63] в качестве основного диагностического признака используют форму амплитудного распределения. Критерием состояния объекта выбирается параметр *b-value* – угол наклона линейной функции, аппроксимирующей амплитудное распределение (рис. 1.5).

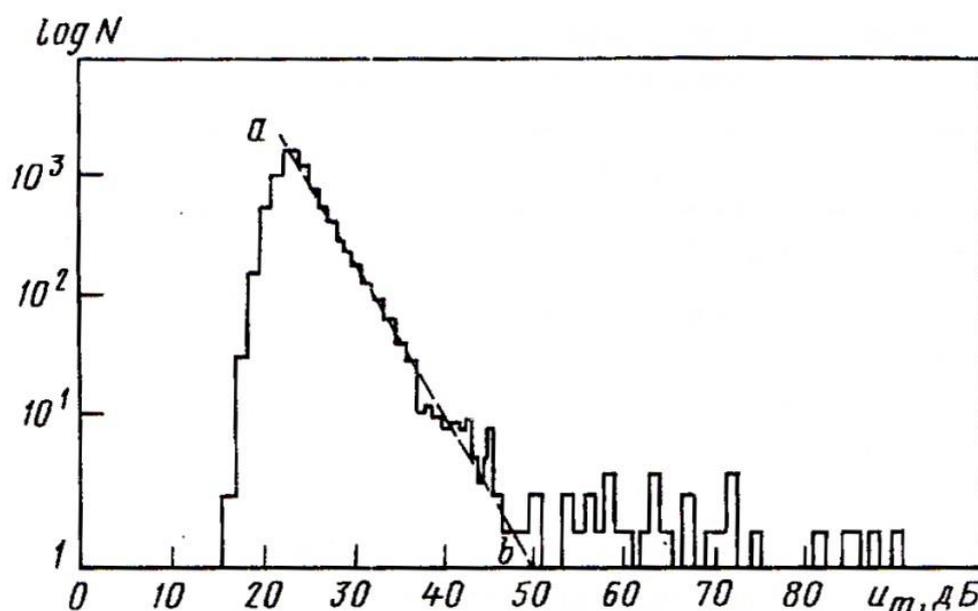


Рисунок 1.5 – Аппроксимация амплитудного распределения при помощи линейной функции *ab* [20]

В работе [64] проведено сопоставление значений критерия *b-value* и нагрузки, приложенной в рамках эксперимента по сжатию образцов, выполненных из горных пород. В результате сопоставления авторам удалось

разделить между собой стадию упругой деформации и момент образования трещины.

При описании процессов разрушения с помощью метода АЭ так же применяется параметры суммарного АЭ (N_{Σ}) и скорости счета (\dot{N}). По экспериментальным данным, полученным при испытании на растяжение серии образцов из стали 10ГН2МФА и 10, автором работы [20] разработана эмпирическая модель, связывающая параметры \dot{N} , $\dot{\varepsilon}$ и ε_p .

$$\dot{N} = A \exp \left[-k_0 \dot{\varepsilon}^{-\frac{1}{2}} u_{\text{п}} \exp(d\varepsilon_p) \right], \quad (1.11)$$

где A и k_0 – константы эксперимента

Суммарная АЭ N_{Σ} напрямую зависит от коэффициента интенсивности напряжений (КИН). По значениям параметра КИН можно определять состояние технических объектов и размеры развивающихся трещин, вследствие чего параметр N_{Σ} широко распространен при разработке критериальных параметров. В работах Данегана и других авторов [20, 65, 66] состояние объекта описывается зависимостью суммарного счета от обобщенного параметра нагрузки, в качестве которого могут выступать не только КИН, но и время, число циклов нагружения, нагрузка, температура и другие:

$$N = aP^m, \quad (1.12)$$

где a и m – константы материала и эксперимента.

Одним из наиболее широко распространенных параметров оценки технического состояния объекта является *локально-динамический критерий* [21], расчет которого осуществляется по приведенной ниже формуле:

$$m_{i(N)} = \Delta N_i P_i / \Delta P_i N_i, \quad (1.13)$$

где $\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$, $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$, N_i и N_{i+1} – суммарная АЭ, P_i и P_{i+1} – обобщенный параметр нагрузки в i -ый и $(i+1)$ -ый момент времени соответственно.

Классификация источников АЭ по локально-динамическому критерию осуществляется по приведенной ниже таблице:

Таблица 1.2. Классификация источников АЭ по параметру m_i

Класс источника АЭ	Значение показателя m_i	Характеристика источника АЭ
I	$m_i < 1$	Пассивный
II	$m_i \approx 1$	Активный
III	$1 < m_i < 6$	Критически активный
IV	$m_i > 6$	Катастрофически активный

К наиболее распространенным параметрам АЭ контроля, при помощи которых проводится оценка состояния промышленных объектов, так же можно отнести активность возникновения акустических сигналов. На основе этого параметра разработано множество методик, описывающих процесс деградации различных материалов. При рассмотрении процессов развития усталостных трещин в процессе циклического нагружения металлических объектов говорят о возникновении эффекта Кайзера или Фелисити [20, 44, 67]. Эффект Кайзера формулируется как отсутствие АЭ активности в материале до тех пор, пока не будет превышен предыдущий уровень нагрузки. Выполнение эффекта Кайзера свидетельствует об упругом характере деформирования. Возникновение большого числа акустических сигналов в процессе повторного нагружения указывает на образование активных дефектов (эффект Фелисити).

На основе приведенных выше закономерностей был разработан подход по квалификации уровня повреждений [68], накопленных в результате воздействия циклических нагрузок. Подход состоит в расчет двух критериальных параметров – *Load Ratio* и *Calm Ratio*. Расчет параметра *Load Ratio* осуществляется путем сопоставления значений АЭ активности на последующем и предыдущем этапе повышения нагрузки. *Calm Ratio* рассчитывается как отношение суммарной АЭ на участках выдержки к общему числу акустических сигналов, зарегистрированных во время исследуемого цикла нагружения.

В работе [69] проводилась оценка развития повреждений в бетонной балке, находящейся под действием повторяющихся нагрузок. В результате построения корреляционной зависимости *Load Ratio* – *Calm Ratio* были выделены основные стадии деградации объекта контроля. Авторами отмечено, что превышение параметром *Calm Ratio* единицы соответствует возникновению серьезных повреждений, развитие которых может привести к разрушению объекта.

Анализ приведенных результатов по связи параметров акустических сигналов с процессами разрушения позволяет сделать важный вывод о возможности применения метода АЭ в задачах мониторинга промышленных объектов, находящихся в процессе эксплуатации. В работах [6, 7] приведены подходы по построению таких систем и способы фильтрации шумовых сигналов. При этом остается актуальным вопрос построения критериальных параметров, основанных на физических процессах развития усталостных дефектов.

1.4 Мониторинг развития усталостных повреждений при помощи метода акустической эмиссии

При создании систем мониторинга опасных промышленных объектов одной из основных задач является оценка кинетики накопления усталостных повреждений. Одним из наиболее эффективных методов диагностики независимо от состояния объекта, ориентации дефекта и стадии разрушения является метод АЭ. С его помощью возможно не только определение состояния технических устройств в режиме реального времени, но и прогнозирование процесса разрушения.

Одним из возможных решений поставленной задачи является сопоставление стандартных АЭ параметров, уровня приложенной нагрузки и результатов построения локационной картины [70]. Авторами проведен сравнительный анализ активности возникновения акустических сигналов и процесса накопления повреждений. На начальном этапе нагружения отмечается равномерный процесс регистрации акустических сигналов,

возникающий на стадиях роста нагрузки. Такой характер накопления импульсов АЭ свидетельствует о равномерном развитии микродефектов. Дальнейшее нагружение объекта приводит к снижению общего количества зарегистрированных событий и возникновению деформаций, распределенных неравномерно по плоскости трубы. Неравномерность накопления повреждений была подтверждена результатами построения локационной картины.

В работе [71] показано совместное применение метода АЭ и кинетического индентирования для оценки степени поврежденности материала, подверженного циклическим нагрузкам. Для выполнения поставленной задачи авторы используют корреляционную зависимость энергии акустических сигналов от медианной частоты. При внедрении конического индентора в недеформированный металл возникают характерные импульсы АЭ с большой энергией и малым уровнем медианной частоты. Воздействие индентора в область металла, деформированного после циклического нагружения объекта, приводит к появлению акустических сигналов, в спектрах которых возрастает доля высокочастотных составляющих. Предложенный подход позволяет создать безобразцовый способ оценки состояния металла трубопроводов, основанный на исследовании частотных параметров импульсов АЭ. При этом его применение подразумевает наличие «атласа акустических образцов» (эталонов) недеформированного металла.

Определение стадии развития усталостных повреждений является актуальной задачей промышленной диагностики, решение которой позволит оценить остаточный ресурс объекта контроля. В работе [72] приводится результат построения корреляционной плоскости $E_{AЭ} - K_f$, полученной при циклическом нагружении титанового сплава Ti-4Al-1,5Mn. По приведенным выше параметрам авторам удалось выделить 3 источника акустических сигналов: 1) образование и движение дислокаций; 2) развитие микротрещин; 3) развитие макротрещин. Каждый из выделенных источников обладает

характерной АЭ активностью, изменение которой свидетельствует о переходе между основными стадиями накопления повреждений.

Одним из основных способов оценки состояния технических объектов при помощи метода АЭ является выявление корреляционных зависимостей между законом Пэриса и параметрами акустических сигналов, зарегистрированных при воздействии циклических нагрузок. Так, в работе [73, 74] проводится исследование образования и развития усталостных повреждений в рамках испытаний металлического образца с боковым надрезом на трехточечный изгиб. Используя суммарное значение выбросов, авторы выявили переход от стадии устойчивого развития к стадии ускоренного роста усталостной трещины. Авторами также отмечается малая активность импульсов АЭ на начальной стадии образования дефекта. В публикации [75] в качестве информационного параметра так же используется суммарное значение выбросов. По приведенной в работе зависимости АЭ параметра от числа циклов нагружения авторы выделяют момент образования усталостной трещины критических размеров. На начальном этапе регистрация АЭ импульсов происходит в случайные моменты времени. При достижении дефектом критических размеров акустические сигналы возникают на каждом цикле нагружения.

Для исследования кинетики роста усталостной трещины малых размеров в работе [76] применяется как система измерения АЭ импульсов, так и оптический микроскоп. В результате проведенных экспериментов по циклическому нагружению алюминиевого образца с боковым надрезом авторами получена корреляционная зависимость между суммарной АЭ и длиной усталостной трещины. Необходимо отметить, что рассчитанные в работе эмпирические коэффициенты применимы только для усталостных трещин, размеры которых не превышают 1 мм.

В связи со сложностью процесса образования и развития усталостных повреждений многие исследователи используют в качестве информационных признаков не только стандартные АЭ параметры, но и частотные

характеристики акустических сигналов. Авторами [77] предложен подход по определению корреляционной связи между скоростью роста усталостной трещины и критерием, основанным на спектральных характеристиках импульса АЭ. Критерием является отношение количества импульсов, зарегистрированных в полосе частот 150-300 кГц, к количеству импульсов, зарегистрированных во всем частотном диапазоне (80-1000 кГц). Авторы провели серию экспериментов по циклическому нагружению образцов L-образной формы, выполненных из алюминиевого сплава и 9% никелевой стали. По результатам экспериментов отмечается линейная зависимость между скоростью роста дефекта и разработанным критерием.

Для определения остаточного ресурса и разделения основных механизмов разрушения, возникающих при развитии усталостных повреждений в работе [78] была использована нейронная сеть Кохонена. Для обучения нейронной сети проведена серия экспериментов по циклическому нагружению образцов из стали А572. В качестве информативных АЭ параметров авторы используют длительность и амплитуду акустических сигналов. В результате применения нейронной сети, обучение которой проводилось на 25% от общего количества зарегистрированных АЭ данных, ошибка определения остаточного ресурса составила 20%. При увеличении обучающей выборки до 75% от общего объема АЭ данных максимальное значение погрешности уменьшилось до 12%.

При исследовании кривых усталостного разрушения и АЭ параметров следует учитывать влияние множества факторов. В работах [79] показано изменение кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) в зависимости от коэффициента асимметрии цикла (R) и геометрических размеров образца. По приведенным в работе [80] результатам необходимо отметить, что наибольшее влияние на форму кривой Перриса оказывает параметр R . Так, при $R = -1$, пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений (ΔK_{th}) было равным $13 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; при $R = 0,1$

значение $\Delta K_{th} = 7,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Авторы отмечают, что изменение формы образца не оказывает существенного влияния на форму КДУР.

Многие исследователи при наблюдении за процессом развития усталостных повреждений совместно с методом АЭ применяют стандартные методы неразрушающего контроля (НК). Например, в работе [81] показано совместное применение АЭ и теплового метода НК. Авторы провели эксперименты по циклическому нагружению компактных образцов с боковым надрезом, выполненных из алюминиевого сплава АА7075. По результатам термографических картин была определена скорость распространения усталостной трещины в зависимости от номера цикла. АЭ метод использовался в качестве инструмента по определению остаточного ресурса и стадии накопления усталостных повреждений. В качестве критерия по оценке остаточного ресурса авторы используют значение параметра RA – отношение времени нарастания к максимальной амплитуде импульса АЭ.

В работе [82] так же показано совместное применение теплового и АЭ метода НК. При помощи них авторы проводят мониторинг состояния титанового образца, подверженного циклической нагрузке. В результате проведенного исследования отмечается высокая чувствительность метода АЭ на всех этапах развития усталостной трещины. В качестве информационного параметра используется значение выбросов. По зависимости АЭ параметра от номера цикла определяется стадия развития дефекта, а термограммы используются для расчета его геометрических размеров. Авторы отмечают, что комбинация теплового и АЭ методов НК является мощным инструментом при мониторинге развития усталостных повреждений.

При исследовании связи между параметрами АЭ контроля и механики разрушения авторы работы [83] установили линейную зависимость между da/dN (скоростью роста усталостной трещины) и dn/dN (скоростью накопления выбросов АЭ). В рамках исследования проводилось циклическое нагружение компактного образца, выполненного из рельсовой стали. В результате испытаний разработана следующая корреляционная модель:

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = 0,738 \log\left(\frac{dn}{dN}\right) - 5,815 \quad (1.14)$$

Авторы отмечают, что полученная модель обладает огромным потенциалом при обследовании и мониторинге объектов контроля, подверженных усталостному разрушению.

Необходимо отметить, что проведение диагностики и мониторинга технических объектов, выполненных из рельсовой стали, является одной из актуальных задач промышленной безопасности. В работе [84] проводится разделение источников шума и процессов усталостного разрушения. В рамках лабораторного эксперимента авторы проводят циклическое нагружение компактного образца с боковым надрезом. В качестве источника шумовых сигналов применяется электромагнитный двигатель, генерирующий импульсы АЭ амплитудой свыше 30 дБ (порог дискриминации). В качестве информативных параметров, при помощи которых проводится разделение источников различной природы, были выбраны: амплитуда, длительность и частота, соответствующая максимальному значению спектра акустического сигнала. По приведенным выше параметрам авторам удалось определить источники четырех типов: 1) машинный шум, 2) деформация образца, 3) рост вязкой трещины и 4) рост хрупкой трещины. В зависимости от активности этих источников оценивается опасность дальнейшей эксплуатации объекта.

В работе [85] проводится анализ АЭ параметров при циклическом нагружении образца внутренним давлением, выполненного из участка трубопровода. В качестве численного параметра (m) для оценки состояния объекта авторами был выбран тангенс угла наклона линейной функции, аппроксимирующей распределение амплитуд акустических сигналов в логарифмическом масштабе. По результатам проведенных экспериментов отмечается уменьшение значения параметра m с ростом уровня повреждений. Так, на этапе формирования и роста усталостного дефекта значение критерия m равно 4,61, а на заключительном этапе нагружения $m = 2.48$. Также

авторами говорится о применении разработанного подхода не только при анализе развития усталостных дефектов, но и при выявлении потенциальных утечек.

Метод АЭ так же широко распространен при контроле судов и плавучих сооружений. В работе [86] проводится исследование изменения формы амплитудного распределения при увеличении размеров усталостных трещин. Для классификации источников АЭ авторы разделяют диапазон изменения значений слогированных амплитуд на 4 области. Каждая из приведенных в работе областей соответствует источнику определенного класса: (a) незначительный источник, (b) источник, связанный с микроразрушениями, например, образование вершины усталостной трещины, (c) развитие трещины до значений 20-30% от критической длины, (d) образование трещины критической длины, соизмеримой с толщиной материала объекта. Авторы отмечают высокую чувствительность метода, а также возможность прогнозирования ресурса технических конструкций с помощью совместного использования метода АЭ и систем тензометрии.

1.5 Достоверность обнаружения источников АЭ

Одним из основных достоинств метода АЭ является определение координат источника акустических сигналов путем построения локационной картины (локации). Определение координат возможно при помощи временного и амплитудного параметра. Амплитудная локация повреждений почти не используется из-за сильного влияния акустического тракта и структуры материала на параметр амплитуды. При этом значение амплитуды используют в качестве вспомогательного признака для повышения достоверности результатов локации. Наибольшее распространение нашли временные методы, в которых используют параметр разности времени прихода импульсов АЭ, зарегистрированных парой ПАЭ [20, 87].

В зависимости от геометрических размеров объекта проводят построение или линейной (одномерной), или планарной (двумерной) локации. Если один из трех линейных размеров значительно превышает два

других, например, в геометрии нефте- и газопроводах, то координаты источников АЭ определяются при помощи линейной локации. Для остальных типов технологических объектов задача локации в основном является двумерной. В простейшем случае построение планарной локации осуществляется при помощи треугольной антенны, состоящей из трех ПАЭ (рис. 1.6).

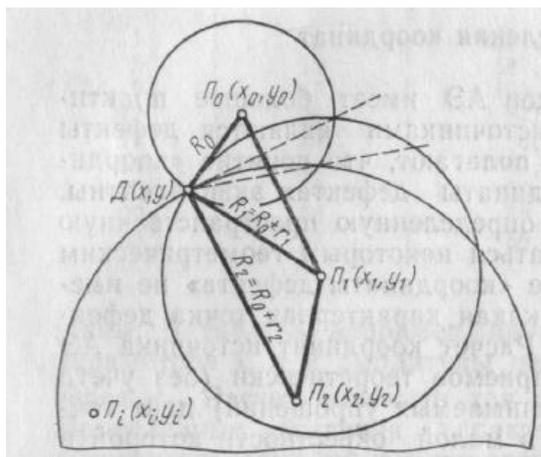


Рисунок 1.6 – Схема локации источника АЭ [87]

На рисунке 1.6 приведена схема локации источника акустических сигналов (точка D) при помощи ПАЭ $P_0(x_0, y_0)$, $P_1(x_1, y_1) \dots P_i(x_i, y_i)$. По известным координатам приемных преобразователей (x_i, y_i) , скорости распространения акустических сигналов (c) и времени регистрации импульса АЭ (t_i) проводится расчет координат источника (x, y) :

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = (R_0 - r_i)^2, \quad (1.15)$$

где $r_i = c(t_1 - t_0) = c\tau_i$, τ_i – временная задержка прихода сигнала на P_i

Неизвестными являются три величины – R_0 , x и y , таким образом, для определения координат источника акустических сигналов необходимо не менее трех ПАЭ.

При построении локационной картины в рамках контроля реальных технических устройств возникает множество мешающих факторов, одним из которых является анизотропия акустических свойств. Для решения этой проблемы авторами работы [88] предложен метод под названием «Акустико-эмиссионная томография». Основным достоинством метода является

совместное применение стандартного алгоритма локации, основанного на времени регистрации импульса АЭ, и параметра скорости, как функции от расстояния и времени.

Развитие метода АЭ позволяет проводить построение не только линейную и планарную, но и объемную локацию. В работе [89] показана разработка методики объемной локации при помощи четырех преобразователей, а применение пяти ПАЭ позволяет определять местоположение источников без предварительного измерения скорости. Авторы отмечают актуальность применения разработанной методики при контроле бетонных конструкций, футеровок металлургических агрегатов и других технических объектов большого объема.

Несмотря на очевидные достоинства метода АЭ в рамках задач НК актуальным остается вопрос оценки достоверности результатов. При обработке данных необходимо учитывать множество факторов, влияющих на значения стандартных АЭ параметров. Например, максимальная амплитуда импульса АЭ зависит не только от пройденного расстояния, но и от частотных характеристик, геометрии объекта, структуры материала и т.д. При распространении акустической волны необходимо принимать во внимание свойство дисперсии, то есть зависимость скорости от частоты. С расстоянием широкополосный акустический сигнал (волновой пакет) *«распадается»* на несколько волновых цугов, что так же приводит к снижению максимальной амплитуды импульса. При этом чем меньше толщина объекта контроля, тем в большей степени выражено свойство дисперсии [90].

В свою очередь точность построения локационной картины зависит от двух параметров – 1) времени регистрации импульса АЭ, 2) скорости распространения акустического сигнала. Так как процесс регистрации импульсов АЭ основан на применении порога дискриминации, то погрешность построения локационной картины напрямую связана с крутизной переднего фронта акустического сигнала (времени нарастания

импульса АЭ). Чем больше значение этого параметра, тем больше погрешность локации. На достоверность результатов построения локации так же влияет значение скорости распространения волнового пакета. Присутствие в сложноструктурных конструкционных материалах (бетонах, композитах и др.) анизотропии приводит к появлению зависимости между скоростью и направлением распространения АЭ сигнала.

Исходя из перечисленных выше факторов, снижающих достоверность метода АЭ, необходимо введение дополнительных вероятностных параметров. В работе [91] показано применение вероятностной модели для оценки достоверности локации источников АЭ. Автором получены функции распределения погрешности определения координат источника при разных значений порога дискриминации и времени нарастания. Необходимо отметить, что оптимальный выбор порога и способа определения начала импульса АЭ приводит к снижению погрешности при расчете координат источника акустических сигналов.

2 Материалы и методы исследования

В настоящей главе приводится описание материалов, измерительной аппаратуры и экспериментальных методов, применяемых в работе. На начальном этапе решения поставленной задачи необходимо проведение лабораторных экспериментов по нагружению металлических образцов под контролем метода акустической эмиссии (АЭ). Алгоритм проведения научных исследований при помощи метода АЭ должен включать в себя следующие разделы:

- 1) Выбор материала и конструкции исследуемого образца, в частности габаритные размеры и форма изделия
- 2) АЭ аппаратура
- 3) Тип и параметры используемых преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ)
- 4) Метод крепления ПАЭ к поверхности исследуемого образца
- 5) Схема расположения ПАЭ
- 6) Параметры АЭ системы сбора данных
- 7) Схема нагружения

2.1 Материалы и образцы

Образцы должны быть выполнены из тех же материалов, что и промышленные объекты, контролируемые при помощи метода АЭ. К таким объектам относятся трубопроводы, резервуары, теплообменные установки, хранилища, ректификационные колонны и др. Согласно [92, 93] резервуары и трубопроводы должны быть изготовлены из горячекатанной или термически обработанной углеродистой стали. На сегодняшний день одной из наиболее распространенных марок стали, удовлетворяющих требованиям нормативных документов, является сталь марки 09Г2С. Распространенность этой марки связана с простотой варки, легкостью, высокими прочностными характеристиками и малой стоимостью.

Таким образом, образцы для лабораторных испытаний необходимо выполнить из марки стали 09Г2С. Химический состав и механические свойства стали приведены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно.

Таблица 2.1 Химический состав стали 09Г2С, %

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As	Fe
до 0,12	0,5- 0,8	1,3- 1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08	~ 96- 97

Таблица 2.2 Физические и химические свойства стали 09Г2С

Характеристика	Значение
Удельный вес ρ , г/см ³	7,85
Временное сопротивление σ_B , не менее, МПа	430
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, не менее, МПа	265
Модуль упругости E , МПа	210000
Относительное конечное удлинение, не менее, %	21
Предел выносливости σ_{-1} , не менее, МПа	235
Коэффициент линейного расширения α , мкм/°К	11,5

Для циклических испытаний форма и габаритные размеры образцов выбираются исходя из рекомендаций, описанных в ГОСТ 25.506-85, и площади захватов испытательной машины, равной 50x50 мм. Для проведения испытаний подготовлена серия образцов прямоугольной формы с краевым надрезом. Толщина образца соответствует $t = 3$ мм, а ширина $b = 50$ мм. Размер рабочей зоны (L) определяется из условия $L \geq 2b$. С учетом площади захватов, длина образца была выбрана равной 350 мм. При задании геометрических размеров надреза необходимо выполнить следующие условия: 1) ширина надреза – $e \leq 0,06b$, 2) угол раскрытия – $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, 3) глубина надреза h выбирается таким образом, чтобы в процессе нагружения образец не разрушился в захватах. Исходя из перечисленных выше условий, рассчитаны геометрические размеры и выбрана форма образца (рис. 2.1).

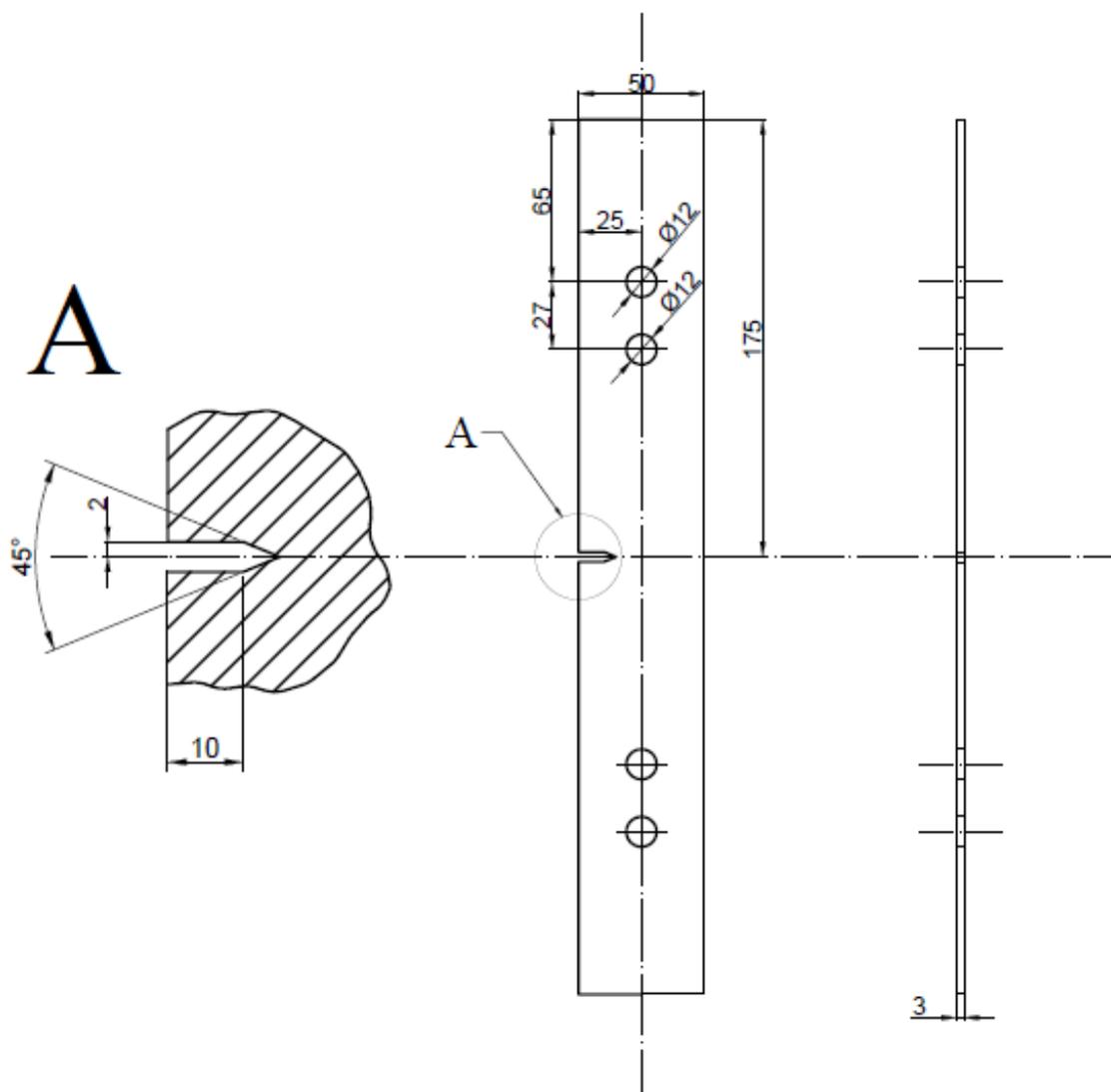


Рисунок 2.1 – Форма образца, выполненного из стали 09Г2С

На рисунке 2.1 показана форма образца, с нанесенными геометрическими размерами. Ширина надреза (e) равна 4 мм, угол раскрытия $\Theta = 45^\circ$, а глубина надреза $h = 10$ мм. В геометрию образца были внесены дополнительные изменения – 4 сквозных отверстия диаметром 12 мм. Сквозные отверстия необходимы для закрепления накладок, демпфирующих шумовые сигналы нагружающей машины (рис. 2.2).

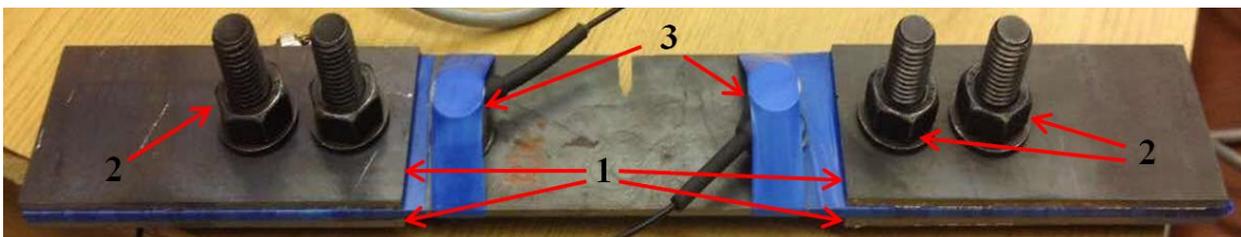


Рисунок 2.2 – Образец, подготовленный к циклическому нагружению

(1) – металлические накладки, демпфирующие шумы нагружающего устройства

(2) – крепежные болты, обеспечивающие неподвижность накладок в процессе циклического нагружения

(3) – ПАЭ

На рисунке 2.2 показан образец, подготовленный к проведению циклических испытаний. Для снижения шумов испытательной машины были использованы металлические накладки размером 50x110x3мм с 4-мя сквозными отверстиями.

2.2 Испытательное оборудование

Испытания на усталость проводились при помощи сервогидравлической испытательной машины INSTRON 8801 (рис. 2.3). Применение машины INSTRON 8801 позволяет проводить испытания как в статическом, так и в динамическом режиме с максимальным значением осевой нагрузки ± 100 кН. В процессе измерения также регистрировался параметр положения подвижной траверсы, при помощи которого возможно определение значений продольной деформации образца в процессе испытаний. Низкая частота следования циклов и высокая точность позиционирования положения подвижной траверсы позволяет сохранять форму линии нагружения без возникновения нелинейных искажений.



Рисунок 2.3 – Общий вид испытательной машины INSTRON 8801 при циклическом нагружении образца с применением метода АЭ

2.3 Методика проведения испытаний

Методика проведения испытаний должна включать в себя такой набор устройств и алгоритмов обработки данных, который обеспечивает получение наиболее полной и достоверной информации. Лабораторные испытания по циклическому нагружению образцов до разрушения включают в себя применение устройств акустико-эмиссионного и оптического методов неразрушающего контроля, а также металлографического анализа.

Испытания образцов проводились при помощи специально разработанных схем нагружения, параметры которых максимально приближены к эксплуатационным нагрузкам (рис. 4).

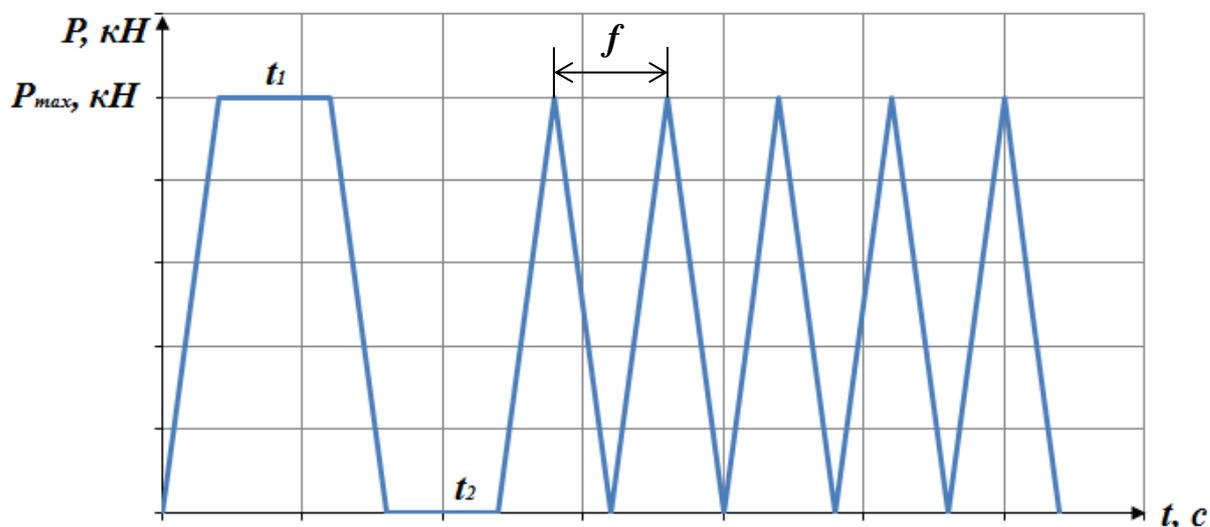


Рисунок 2.4 – Схема нагружения объекта контроля

На рисунке 2.4 показана схема нагружения, состоящая из двух этапов. Первый этап – это единственный цикл трапециевидной формы, включающий участок подъема и сброса нагрузки, а также два участка выдержки длительностью $t_1 = 60$ с и $t_2 = 60$ с при максимальной (P_{max}) и нулевой нагрузке соответственно. Предварительный цикл нагружения необходим для оценки акустической активности шумовых источников. На нем проводится проверка работоспособности измерительной аппаратуры, уточнение уровня механических шумов, возникающих при работе электродвигателей нагружающей установки, и корректировка порога дискриминации импульсов АЭ.

Второй этап – последовательность циклов треугольной формы с частотой нагружения (f) при изменении нагрузки от (P_{min}) до (P_{max}). Образцы не подвергались специальной температурной и механической обработке, поэтому воздействие первых 5-10 циклов треугольной формы может привести к появлению потока АЭ данных высокой активности.

Источником таких сигналов является процесс выравнивания внутренних напряжений металла.

Расчет максимальной нагрузки (P_{max}) проводится с учетом рабочих напряжений ($\sigma_{раб}$), возникающих в процессе эксплуатации нефтепроводов класса I DN1200 с внутренним давлением $P_{вн} = 5$ МПа. Для выбранного типа труб значение внутреннего диаметра $D_{вн} = 1192$ мм, толщина стенки равна $\delta = 14$ мм, а возникающие в металле напряжения определяют по приведенной ниже формуле:

$$\sigma_{раб} = \frac{P_{вн} \cdot D_{вн}}{2\delta} = 213 \text{ МПа} \quad (1.1)$$

В рамках исследовательской работы оценивается степень влияния параметров схемы нагружения образца на результаты АЭ диагностики. К ним можно отнести скорость нагружения (V), максимальную нагрузку цикла (P_{max}) и коэффициент асимметрии цикла ($R = P_{min}/P_{max}$). Расчет значений (P_{max}) проводится по приведенной ниже формуле:

$$P_{max} = \sigma \cdot S = \sigma \cdot t \cdot b, \quad (1.2)$$

где σ – значение напряжения, t – толщина образца, b – ширина образца, S – площадь поперечного сечения.

Расчет параметра максимальной нагрузки осуществлялся с использованием известных геометрических размеров металлического образца (рис. 2.1) для трех значений эквивалентных напряжений – $90\% \sigma_{раб}$, $100\% \sigma_{раб}$, $110\% \sigma_{раб}$. Всего проведено 40 лабораторных испытаний по циклическому разрушению металлических образцов, выполненных из стали марки 09Г2С, с использованием различных схем нагружения. В таблице 2.3 приведены параметры этих схем.

Таблица 2.3 Значения основных параметров схем нагружения

№ схемы	f , Гц	R	P_{max} , кН
1	1	0	23
2	1	0	21
3	1	0	19
4	0,5	0	21
5	2	0	21
6	10	0	21
7	2	0,25	21
8	2	0,5	21

Для определения кинетики накопления повреждений в металле определяется как размер усталостной трещины, так и значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Расчет КИН в общем случае проводится по указанной ниже формуле и зависит не только от приложенных к телу напряжений σ и длины трещины l , но также является функцией геометрии объекта и схемы его нагружения [94]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} Y \left(\frac{l}{t} \right), \quad (1.3)$$

где $Y \left(\frac{l}{t} \right)$ – поправка (К-тарировка) на геометрию и схему нагружения. Эту поправку обычно представляют в виде таблицы (табл. 1) или многочлена:

$$Y(\lambda) = c_0 + c_1 \lambda + c_2 \lambda^2 + c_3 \lambda^3 + \dots, \quad (1.4)$$

где $\lambda = \frac{l}{b}$, l – размер трещины, b – толщина объекта.

Принимая во внимание форму образца (рис. 1), для которого $l = 15$ мм, $b = 35$ мм и $\lambda = \frac{l}{b} = \frac{15}{35} = 0,43 < 0,7$, К-тарировка рассчитывается следующим образом:

$$Y(\lambda) = 1,99 - 0,41\lambda + 18,70\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4 \quad (1.5)$$

Используя значения скорости роста трещины $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ и коэффициента интенсивности напряжений K , проводится построение диаграммы усталостного разрушения (рис. 2.5).

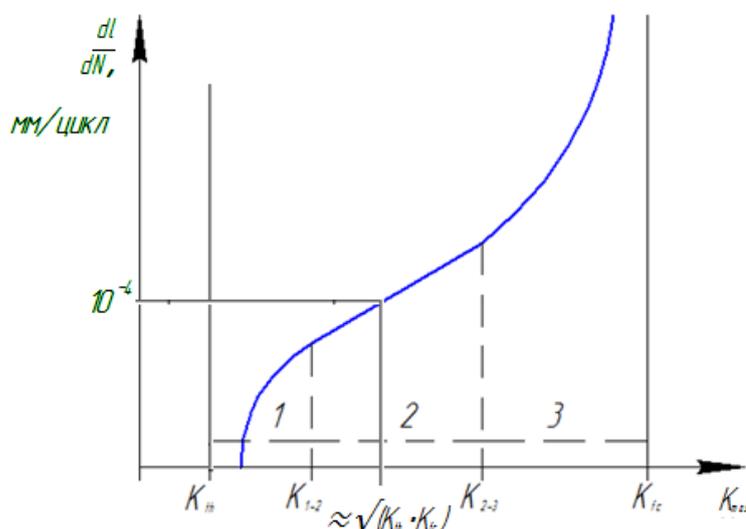


Рисунок 2.5 – Диаграмма усталостного разрушения в логарифмических координатах; 1, 3 – области низких и высоких скоростей роста трещины, 2 – область справедливости формулы Пэриса

На рисунке 2.5 показана классическая диаграмма усталостного разрушения с 3-мя характерными областями. Область 1 соответствует периоду рассеянного накопления повреждений и образованию микротрещины в области надреза (момент страгивания трещины). Область 2 соответствует квазистатическому процессу подрастания трещины от начального состояния до критического размера. Область 3 – заключительная стадия накопления повреждений, при которой наблюдается динамический рост трещины. Таким образом, исследуя форму диаграммы усталостного разрушения, можно разделить основные стадии процесса деградации материала и сопоставить их со стандартными параметрами АЭ контроля.

2.4 Измерительная аппаратура

При разработке новой методики по оценке степени опасности усталостных повреждений необходимо использовать современное оборудование, позволяющее регистрировать необходимую информацию с

высоким уровнем достоверности. В настоящей работе применяется междисциплинарный подход, состоящий в применении не только аппаратуры АЭ диагностики, но и средств оптического метода неразрушающего контроля. Для выявления структурных неоднородностей металла, влияющих на значения стандартных АЭ параметров, применяется специализированный оптический микроскоп.

2.4.1 Регистрация потока АЭ данных

В процессе испытаний регистрация акустических сигналов осуществлялась при помощи промышленной системы A-Line 32D фирмы ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Измерительный тракт аппаратуры включал в себя резонансные преобразователи GT200 компании ООО «ГлобалТест» и предварительные усилители электрического сигнала ПАЭФ-014 с коэффициентом усиления 26 дБ. Собственные шумы аппаратуры, предусилителя и ПАЭ составили 26 дБ. Установка преобразователей на поверхность объекта проводится через специальную контактную среду. В качестве контактной среды использовался литол, обеспечивающий оптимальный акустический контакт между преобразователем и объектом контроля.

ПАЭ закреплялись на поверхности образца изоляционной лентой. После их установки при помощи АЭ имитатора проводилась оценка качества акустического контакта и работоспособность преобразователей. В качестве источника сигналов АЭ использовался имитатор Су-Нильсена, представляющий собой графитовый стержень диаметром 0,3 – 0,5 мм и твердостью 2Т. Излучение акустических сигналов проводится путем слома стержня механического карандаша длиной 2,5-3 мм, установленного на поверхность объекта под углом 30°. Разброс максимальных амплитуд импульсов АЭ, зарегистрированных преобразователями от одного источника, не превышал 3 дБ, что удовлетворяет техническим требованиям при проведении АЭ контроля [21].

После установки образца в захваты нагружающей машины уровень акустического шума возрос до 36 дБ (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Пример шумового сигнала АЭ, зарегистрированного при установке образца в захваты нагружающей машины

По значениям максимального уровня шума (U_{noise} , дБ) и рекомендациям нормативного документа ПБ 03-593-03 порог дискриминации (U_d , дБ) акустических сигналов необходимо рассчитывать исходя из неравенства $U_d \geq U_{noise} + 6$ дБ. Таким образом, значение порога дискриминации было выбрано равным 42 дБ.

До начала нагружения в настройках АЭ аппаратуры необходимо задать частотные и временные параметры – а) полоса пропускания цифрового фильтра, б) SCETO, в) Dead Time и г) Max. Duration. В связи с применением квазирезонансного преобразователя GT200 с центральной частотой полосы пропускания равной 180 кГц и присутствием шумовых сигналов нагружающей машины полоса пропускания цифрового фильтра была выбрана равной 100-350 кГц. Для объектов с малыми геометрическими размерами значение параметра SCETO обычно выбирают равным 500 мкс, Deat Time = 32 мкс и Max. Duration = 32000 мкс.

Методика проведения АЭ контроля также включает в себя построение локационной картины, необходимой для определения координат источника акустических сигналов. Тип антенной решетки, количество и расстояние между преобразователями напрямую связано с геометрическими размерами

объекта контроля. При исследовании малогабаритных образцов обычно проводят построение линейной локации, состоящей из 2-ух ПАЭ (рис. 2.7).

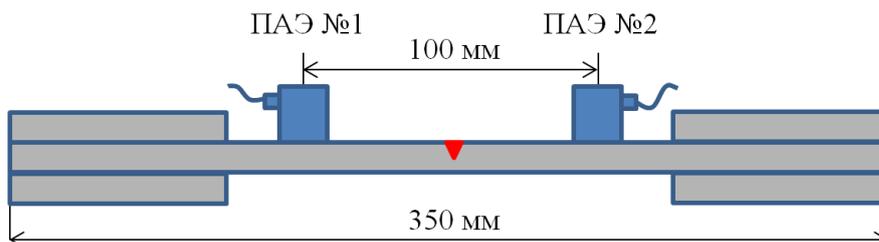


Рисунок 2.7 – Построение линейной локации на поверхности объекта контроля

На рисунке 2.7 показана линейная локация, состоящая из 2-ух ПАЭ, равноудаленных от надреза на расстояние 50 мм. Расчет координат источника акустических сигналов осуществляется по разнице времени прихода (РВП) сигналов на преобразователи и значению групповой скорости.

Для определения групповой скорости распространения акустических сигналов в работе применяется классический подход, описание которого приведено на рисунке 2.8.

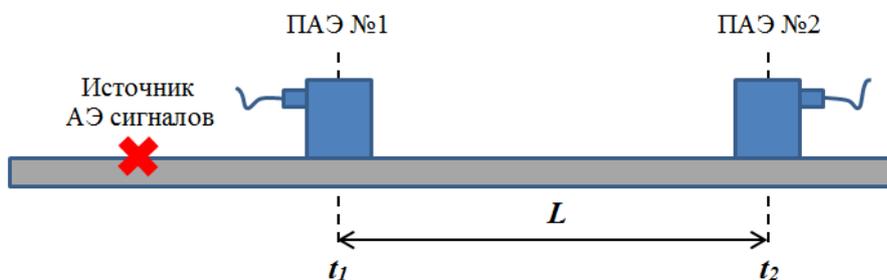


Рисунок 2.8 – Способ расчета групповой скорости распространения АЭ сигналов

Для определения значения групповой скорости распространения акустических сигналов необходимо установить на объект контроля 2 ПАЭ, удаленных на расстояние L . Имитатор импульсов АЭ располагается на одной линии с преобразователями вне локационной зоны на расстоянии 10-20 см от одного из ПАЭ. Измерение значений времени прихода импульсов АЭ на каждый из преобразователей (t_1 и t_2) проводится при излучении не менее 5

акустических сигналов. По этим значениям и известному расстоянию L рассчитывается групповая скорость ($V_{гр}$):

$$V_{гр} = \frac{L}{t_2 - t_1} \quad (2.6)$$

Применение описанной выше методики позволило определить значение групповой скорости распространения акустических сигналов для исследуемых образцов (рис. 2.1). Значение групповой скорости было выбрано равным $V_{гр}=3650$ м/с.

2.4.2 Определение акустических характеристик объекта контроля

На пути распространения от источника до приемного преобразователя акустическая волна претерпевает множество изменений, связанных с процессами затухания, рассеяния и дисперсии. Так как импульс АЭ представляет собой комбинацию волновых цугов, то каждый из них будет обладать определенными частотными характеристиками и значениями групповой скорости. На рисунке 2.9 приведены значения скоростей в зависимости от геометрических размеров объекта контроля.

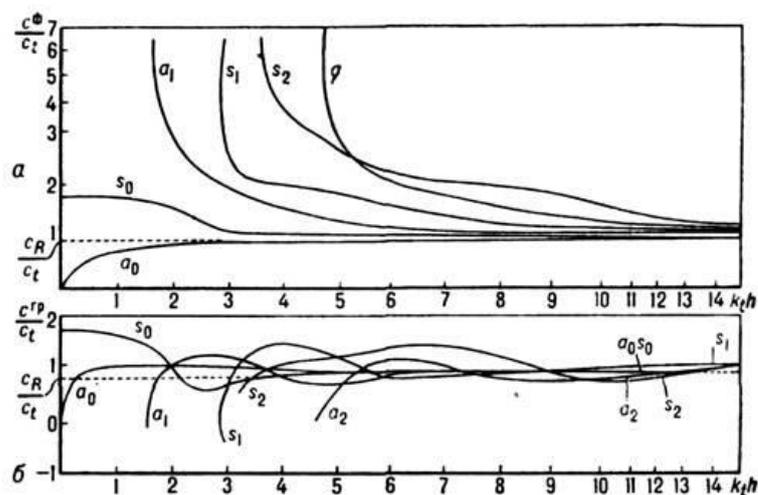


Рисунок 2.9 – Зависимости фазовой (а) и групповой (б) скоростей симметричных (S) и антисимметричных волн Лэмба различных порядков от толщины волновода (h)

Сложность акустической картины определяется многократным взаимодействием продольных, поперечных и поверхностных волн,

распространяющихся по волноводу. Их комбинация формирует волны Лэмба, представляющие собой набор симметричных и антисимметричных мод. Как показано на рис. 2.9, влияние дисперсии приводит к существенным изменениям групповой скорости в зависимости от толщины волновода и частотных характеристик. Таким образом, для получения достоверных результатов АЭ мониторинга необходимо проводить серию предварительных испытаний по оценке акустических свойств объекта контроля. Известно, что затухание звуковой волны зависит от частоты сигнала. Чем выше частота, тем больше затухание. Согласно [20] интервал относительно быстрого затухания импульса АЭ можно назвать «условно ближней» зоной, а область медленного затухания – «условно дальней» зоной. Для изучения этого процесса необходимо изучить зависимость амплитуды акустического сигнала от расстояния. С её помощью можно определить не только значения коэффициента затухания, но и максимальное расстояние между соседними ПАЭ. Для решения поставленной задачи была проведена серия экспериментов по излучению акустических сигналов на поверхности участка трубопровода диаметром 1020 мм и толщиной стенки 17 мм. На рисунке 2.10 изображен объект контроля и схема установки преобразователей



Рисунок 2.10 – Исследование свойств акустического тракта участка газопровода

Для проведения испытаний на участке трубопровода была использована промышленная система ALine32D-PCI компании «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Всего на поверхность образца установлено четыре измерительных канала, включающих в себя ПАЭ GT200 и предусилитель ПАЭФ-014 с полосой пропускания 30-500 кГц и коэффициентом усиления 26 дБ. В качестве источника акустических сигналов использовался имитатор Су-Нильсена, так как его параметры наилучшим образом повторяют характеристики акустических сигналов, возникающих при развитии дефектов. Методика проведения испытания была разработана таким образом, чтобы зарегистрировать импульс АЭ через каждые 0,5 метров. При этом максимальное расстояние между двумя преобразователями составило 10 метров. На рисунке 2.11 представлена схема проведения испытаний и координаты излучения акустических сигналов.

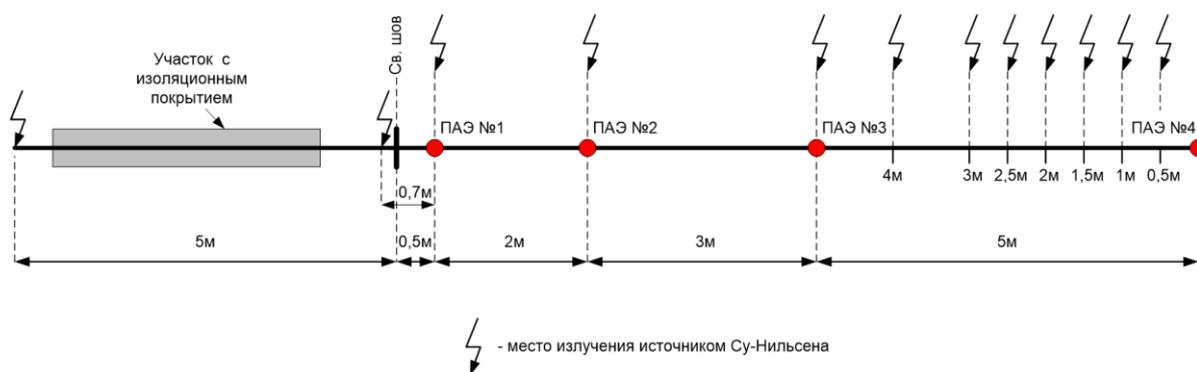


Рисунок 2.11 – Схема проведения испытаний по определению акустических свойств участка газопровода

На рисунке 2.11 показаны местоположения ПАЭ и основные технологические особенности объекта контроля. Перед проведением испытаний произведено удаление изоляционного покрытия. В местах установки преобразователей поверхность трубопровода была зачищена до металлического блеска. Проверка качества акустического контакта осуществлялась путем излучения импульсов АЭ вблизи преобразователей. На рисунке 2.12 представлены результаты построения амплитудной характеристики.

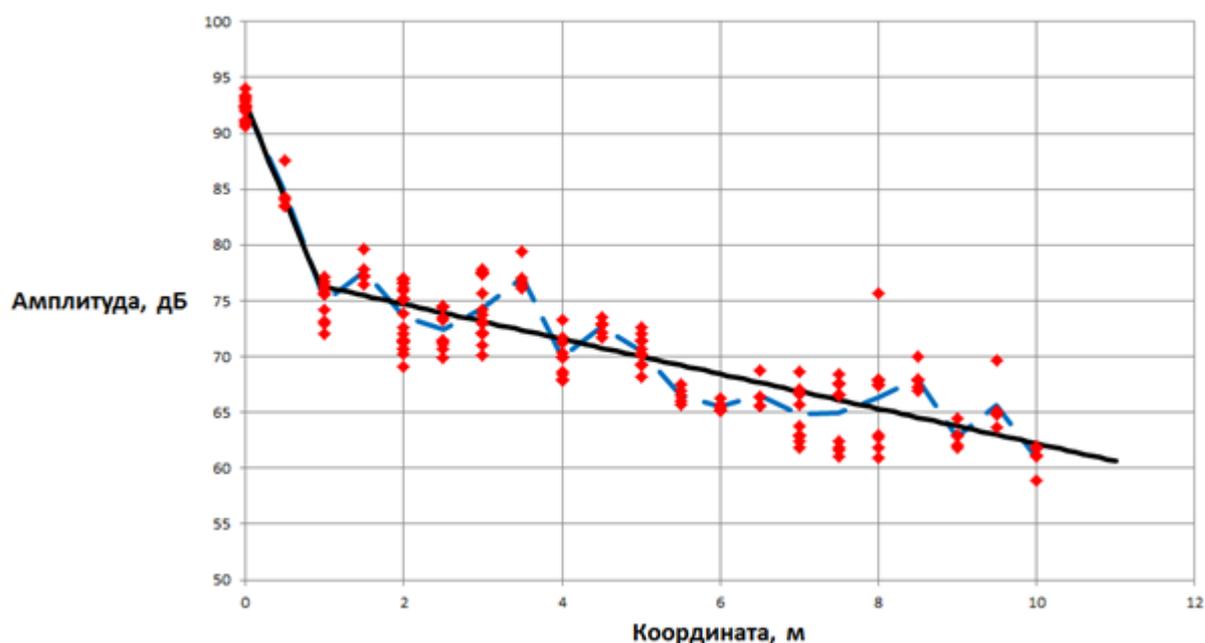


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной амплитуды импульса АЭ от координаты излучения

По приведенной на рисунке 2.12 зависимости можно выделить две характерные области. Первая область соответствует диапазону изменения пространственной координаты от 0 до 1 метра относительно источника Су-Нильсена. На выделенном интервале отмечается резкое снижение максимальной амплитуды импульса АЭ с 95 дБ до 77 дБ, что соответствует коэффициенту затухания 17 дБ/м. Вторая область расположена в интервале 1-10 метров от источника акустических сигналов. В этом диапазоне максимальная амплитуда импульса АЭ снизилась с 77 дБ до 64 дБ, что соответствует коэффициенту затухания 1,44 дБ/м. Появление двух областей связано с быстрым затуханием высокочастотных составляющих в «условно ближней» зоне распространения акустического сигнала.

2.4.3 Применение оптического метода НК

Для определения размеров усталостной трещины при циклическом нагружении металлических образцов применяется оптический метод неразрушающего контроля. При помощи эндоскопической камеры (рис. 2.13) каждые 5 секунд проводится съемка поверхности объекта контроля.

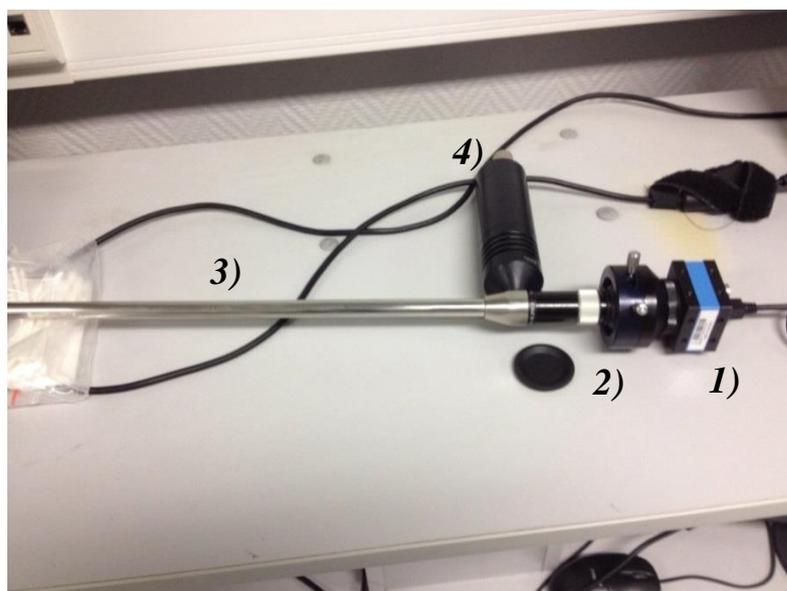


Рисунок 2.13 – Эндоскопическая камера, состоящая из (1) фото- и видеокамеры, (2) линзы, (3) металлического зонда, (4) аккумуляторной батареи

На рисунке 2.14 приведен пример изображения поверхности металлического образца, зарегистрированного при помощи эндоскопической камеры.

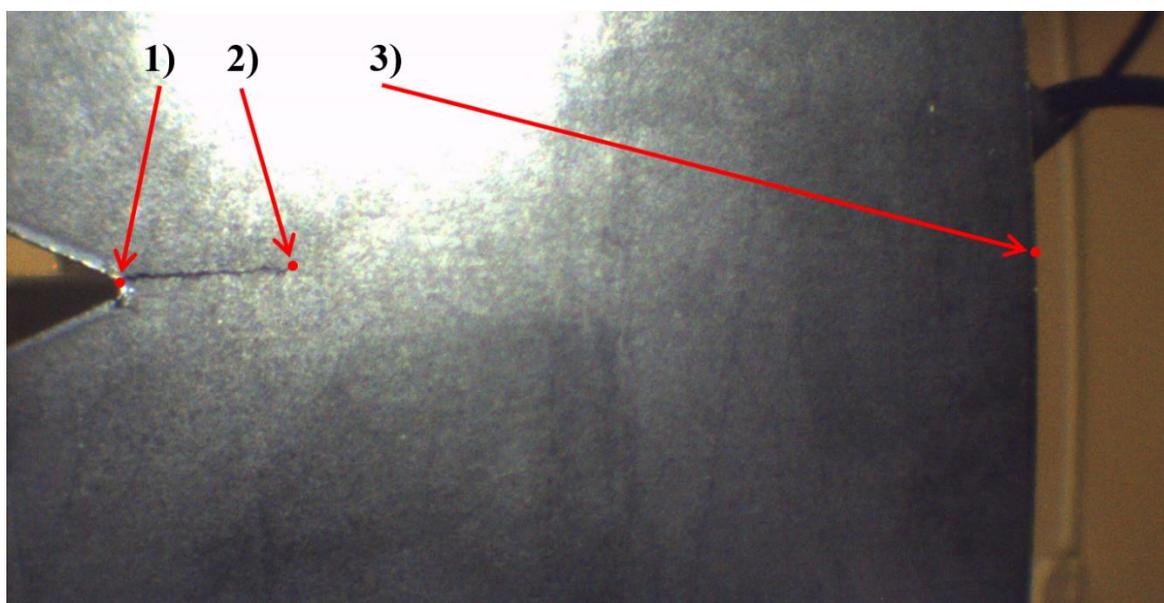


Рисунок 2.14 – Изображение усталостной трещины, полученное при проведении лабораторных испытаний

Для расчета длины усталостной трещины на изображении выбирается три характерные точки (рис. 2.14): 1) вершина концентратора напряжений, 2) вершина усталостной трещины, 3) граница образца. По координатам точек 1),

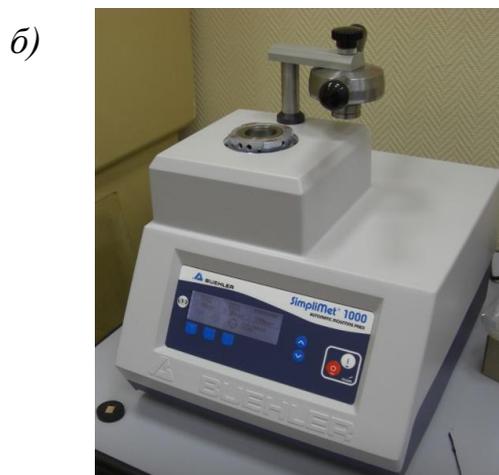
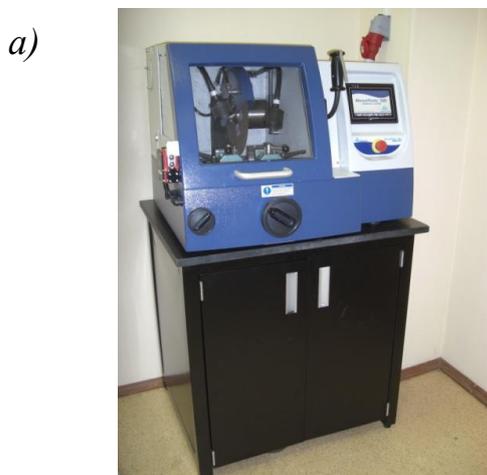
2) и 3) (x_1 , x_2 и x_3 соответственно) и значению ширины образца ($b_{\text{раб}}$) проводится расчет длины усталостной трещины (l):

$$l = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \cdot b_{\text{раб}} \quad (2.7)$$

2.4.4 Исследование микроструктуры испытуемого материала

Основной задачей металлографического исследования является оценка среднего размера зерна и наличия неметаллических включений, влияющих как на кинетику развития дефектов, так и на значения АЭ параметров. Исследуемый материал – лист из низколегированной конструкционной кремнемарганцовистой стали марки 09Г2С.

Подготовка к исследованию микроструктуры начиналась с отрезания заготовки для микрошлифа на станке Buehler AbrasiMatic 300 (рис. 2.15а). Затем отрезанный фрагмент был запрессован в компаунд EpoMet методом горячей запрессовки на аппарате Buehler SimpliMet 1000 (рис. 2.15б). Запрессовка производилась при температуре $t^\circ = 150^\circ\text{C}$ в течение 3...5 минут. Запрессованный образец подвергался шлифованию на станке Buehler EcoMet 250 (рис. 2.15в), а затем полировке с использованием алмазной пасты и специальных абразивов сверхмелкой зернистости (размер абразивных частиц не более 0.5 мкм). После этого микрошлиф подвергали химическому травлению в течение 10...30 с в 4%-растворе азотной кислоты в этиловом спирте.



в)



Рисунок 2.15 – Отрезной станок Buehler AbrasiMatic 300 (а), автоматический станок для горячей запрессовки Buehler SimpliMet 1000 (б) и шлифовально-полировальный станок Buehler EcoMet 250 (в)

Для исследования микроструктуры использовали оптический микроскоп Zeiss Observer Z1m (рис. 2.16, 2.17). Исследования проводились по методу светлого поля при увеличениях 50х...800х.

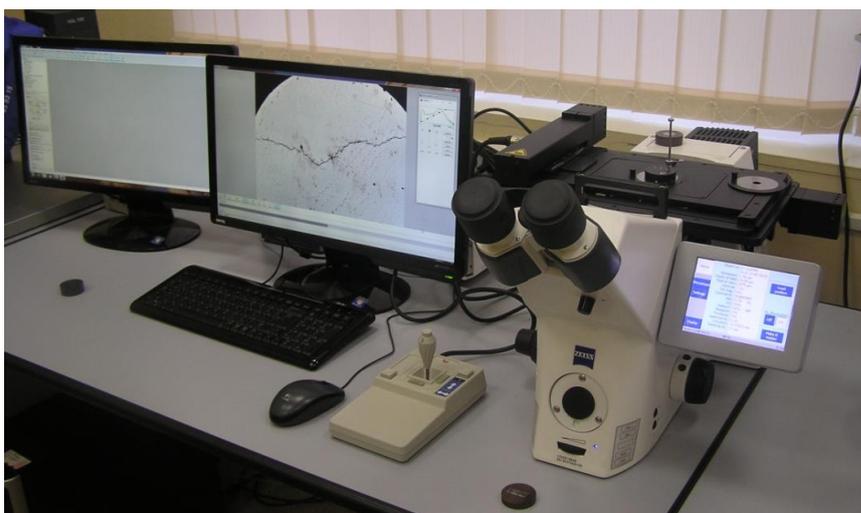


Рисунок 2.16 – Микроскоп Zeiss Observer Z1m

Структура металла является относительно мелкозернистой. Средний размер зерна, определенный с помощью метода линейного анализа согласно ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» методом подсчета пересечений границ зерен (п. 3.5 ГОСТ 5639-82), составляет около 6 мкм.

Исследования на нетравленном шлифе показали, что в металле присутствуют одиночные неметаллические включения с размерами до 10 мкм.

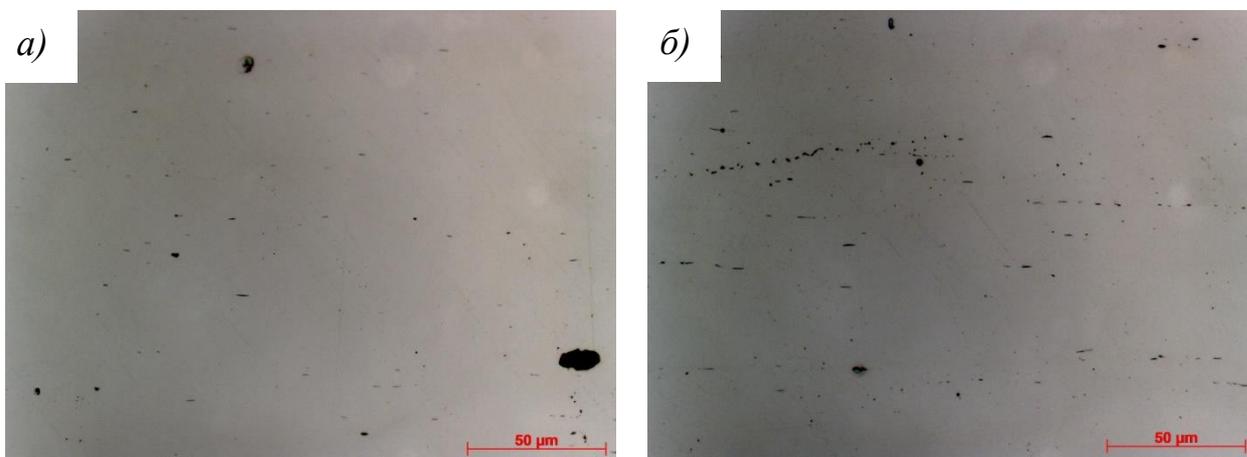


Рисунок 2.17 – Микроструктура металла трубопровода вблизи поверхности (а) и в центральной части листа (б) при увеличении 800х

Кроме того, в металле центральной части листа обнаружены строчечные неметаллические включения (предположительно, сульфиды), вытянутые в направлении проката (рисунок 2.17б). Такие неметаллические включения являются естественными концентраторами напряжений и значительно снижают работу зарождения дефектов типа расслоений и трещин.

3 Исследование АЭ параметров, зарегистрированных на основных стадиях развития усталостных повреждений

Как отмечалось во второй главе, для оценки скорости накопления повреждений в металле проводится построение кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Построение КДУР осуществляется по скорости роста усталостной трещины (УТ) за цикл и размаху коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Главным достоинством АЭ контроля является возможность оценки стадии развития таких повреждений по параметрам потока акустических сигналов. При этом, чем динамичнее процесс деградации материала, тем больше высвобождается упругой энергии, которая частично регистрируется в качестве импульсов АЭ.

В настоящей главе выделены закономерности между изменением характера потока АЭ данных и основными областями КДУР. Также проведены исследования «вторичных» источников сигналов АЭ, влияющих на результаты диагностики.

3.1 Исследование кинетики развития дефекта при изменении параметров схемы нагружения

Режимы работы промышленного оборудования выбирают исходя из требований к параметрам ресурса и значениям максимальных эксплуатационных нагрузок. При этом одно и то же техническое устройство в зависимости от выполняемых задач может быть нагружено по различным параметрам. К основным параметрам схемы нагружения относятся максимальная нагрузка цикла, частота нагружения и коэффициент асимметрии цикла. На начальном этапе работы проведено исследование влияния максимальной нагрузки цикла на кинетику развития дефектов. Для решения поставленной задачи проведена серия испытаний металлических образцов при максимальной нагрузке цикла (P_{max}) равной 23, 21 и 19 кН. На рисунке 3.1 представлены характерные формы КДУР, зарегистрированные в процессе лабораторных испытаний.

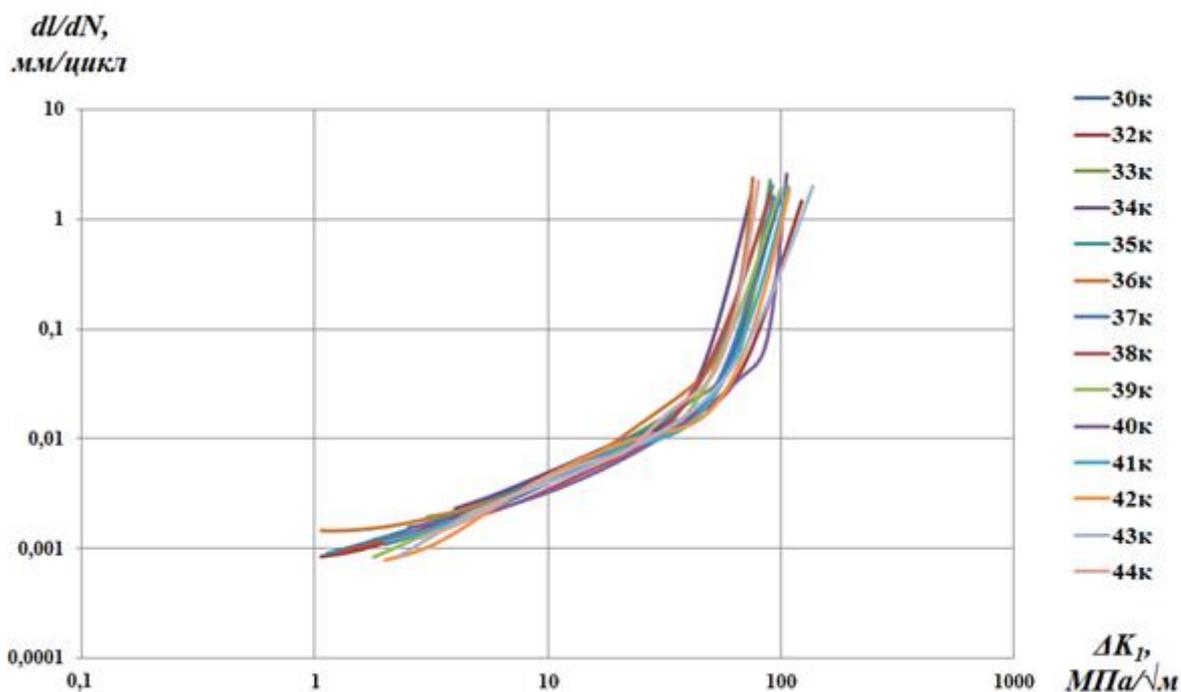


Рисунок 3.1 – Сопоставление КДУР, полученных при испытании образцов с различным уровнем максимальной нагрузки

По результатам, приведенным на рисунке 3.1, необходимо отметить, что форму КДУР независимо от параметра P_{max} можно разделить на участки стабильного и ускоренного роста усталостного дефекта. Первая область соответствует квазистатическому процессу подрастания трещины от начального состояния до критического размера, при котором коэффициент интенсивности напряжений достигает порогового значения ΔK_{2-3} . На этом интервале отмечается плавное повышение параметра скорости роста дефекта (dl/dn). Дальнейшее нагружение образца приводит к этапу ускоренного роста усталостной трещины, на котором значение dl/dn возрастает с большей скоростью. При сопоставлении полученных результатов были выявлены следующие закономерности. Повышение максимальной нагрузки цикла существенно не влияет на форму КДУР. На участке стабильного роста усталостной трещины скорость изменения параметра $\Delta l/\Delta N$ остается неизменной независимо от значения P_{max} . В связи с этим момент перехода к этапу ускоренного роста дефекта наступает при сопоставимых значениях

ΔK_{2-3} . На этапе ускоренного роста дефекта зарегистрировано резкое повышение скорости его развития.

Следующим этапом исследования является определение закономерностей кинетики развития усталостных повреждений при различных значениях коэффициента асимметрии цикла (R). Для решения поставленной задачи проведена серия экспериментов по циклическому нагружению металлических образцов при $R=0, 0,25$ и $0,5$, для $P_{max}=21$ кН и $f=2$ Гц. На рисунке 3.2 представлены характерные формы КДУР, зарегистрированные в процессе лабораторных испытаний.

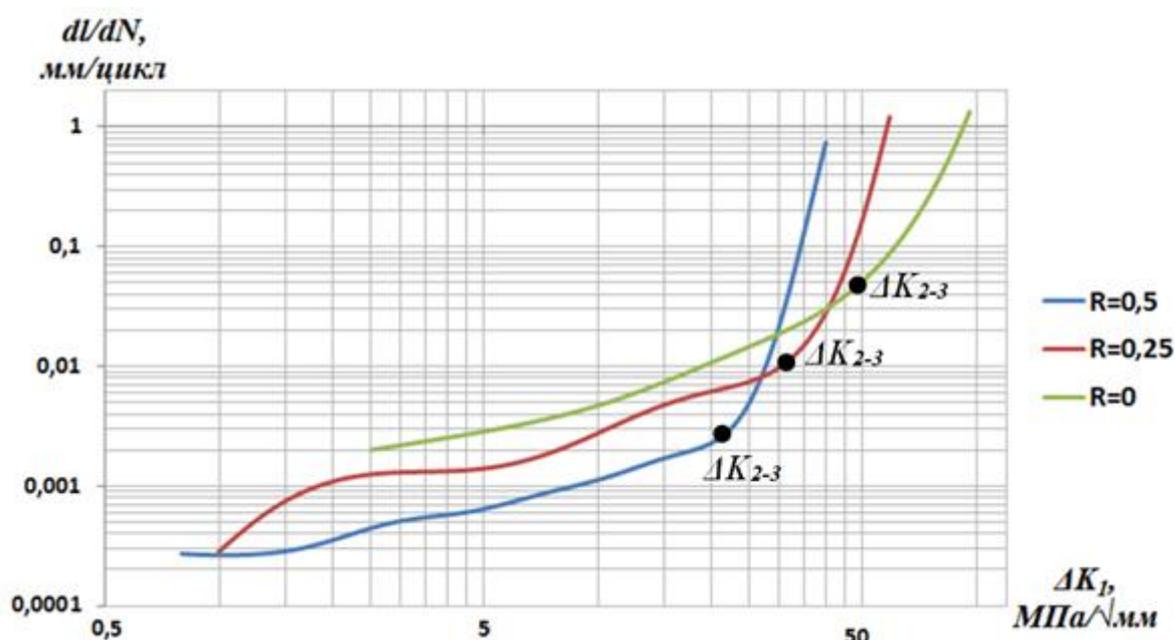


Рисунок 3.2 – Сопоставление КДУР, полученных при испытании образцов с различным значением коэффициента асимметрии цикла

По результатам, приведенным на рисунке 3.2, следует выделить следующие закономерности. Аналогично результатам предыдущего исследования (рис. 3.1) форму КДУР независимо от значения R можно разделить на два характерных участка. На этапе стабильного роста усталостной трещины зарегистрировано увеличение параметра dl/dn при уменьшении коэффициента асимметрии цикла. При этом отмечается, что момент перехода к этапу ускоренного развития дефекта наступает при меньших значениях ΔK_{2-3} в зависимости от увеличения параметра R .

Дальнейшее нагружение образца характеризуется значительным ростом параметра dl/dn , приводящим к разрушению объекта контроля.

Следующим этапом работы является исследование зависимости стандартных АЭ параметров и кинетики накопления повреждений от частоты нагружения (f). Для решения поставленной задачи проведена серия лабораторных испытаний по циклическому нагружению металлических образцов при $f=0,5, 1, 2$ и 10 Гц, а также $P_{max}=21$ кН, $R=0$. В процессе испытаний зарегистрированы как параметры акустических сигналов, так и длины усталостной трещины. На рисунке 3.3 показаны зависимости размера трещины от номера цикла нагружения.

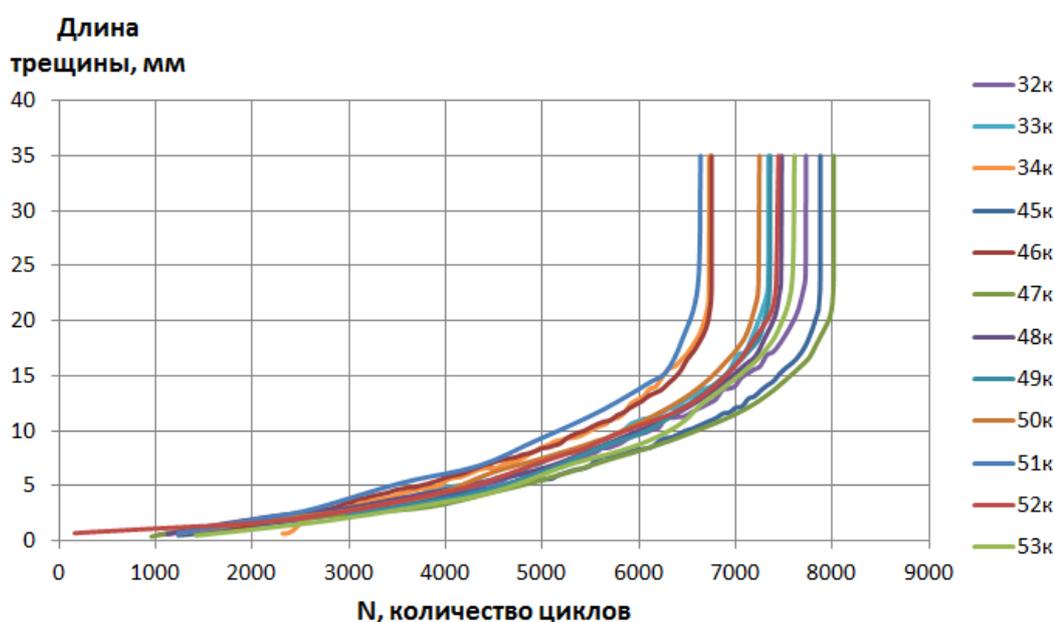


Рисунок 3.3 – Зависимость длины усталостной трещины при различных значениях частоты нагружения

Как показано на рисунке 3.3, количество циклов до разрушения ($N_{разр}$) изменяется в диапазоне от 6637 до 8015, что является несущественным разбросом в рамках проведения усталостных испытаний. Для сопоставления кинетики развития повреждений в зависимости от значений f следует проанализировать параметры КДУР, формы которых приведены на рисунке 3.4.

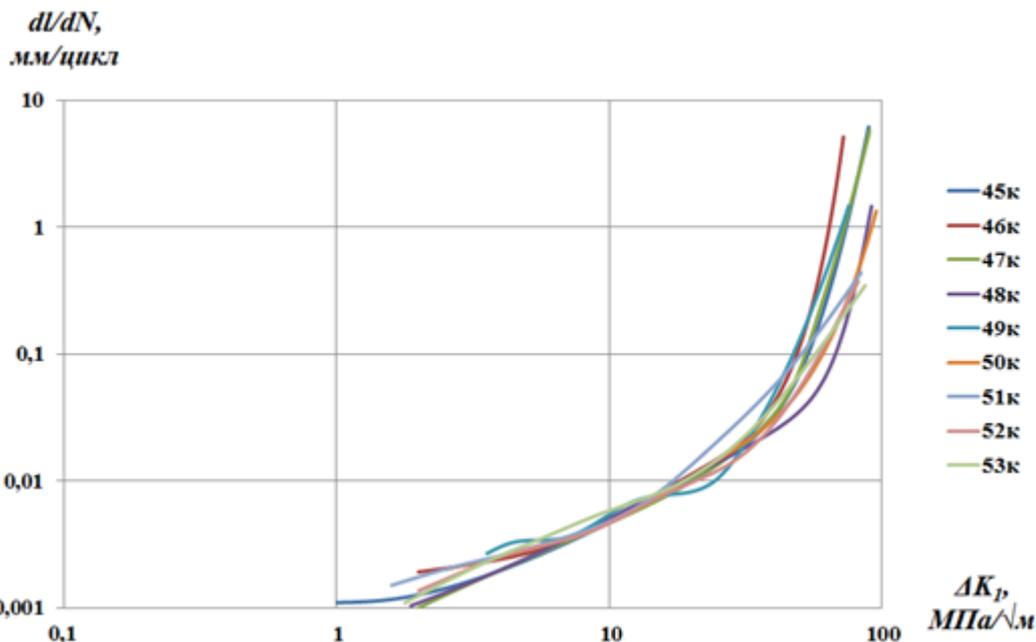
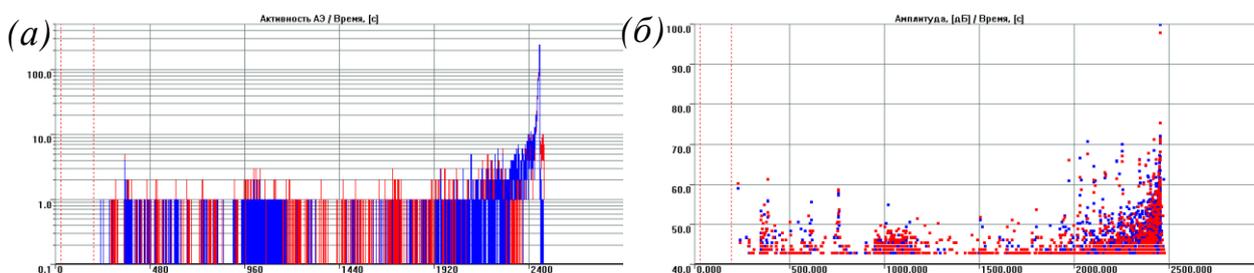


Рисунок 3.4 – Сопоставление КДУР, полученных при испытании образцов с различной частотой нагружения

Согласно приведенным на рисунке 3.4 результатам форму КДУР можно разделить на участки стабильного и ускоренного роста усталостной трещины. При этом изменение параметра f не приводит к значительным изменениям в кинетике накопления усталостных повреждений.

3.2 Закономерности изменения АЭ параметров при развитии УТ

Следующим этапом является обработка акустических сигналов, зарегистрированных на основных стадиях развития УТ. На рисунке 3.5 приведены характерные формы зависимостей стандартных АЭ параметров от времени.



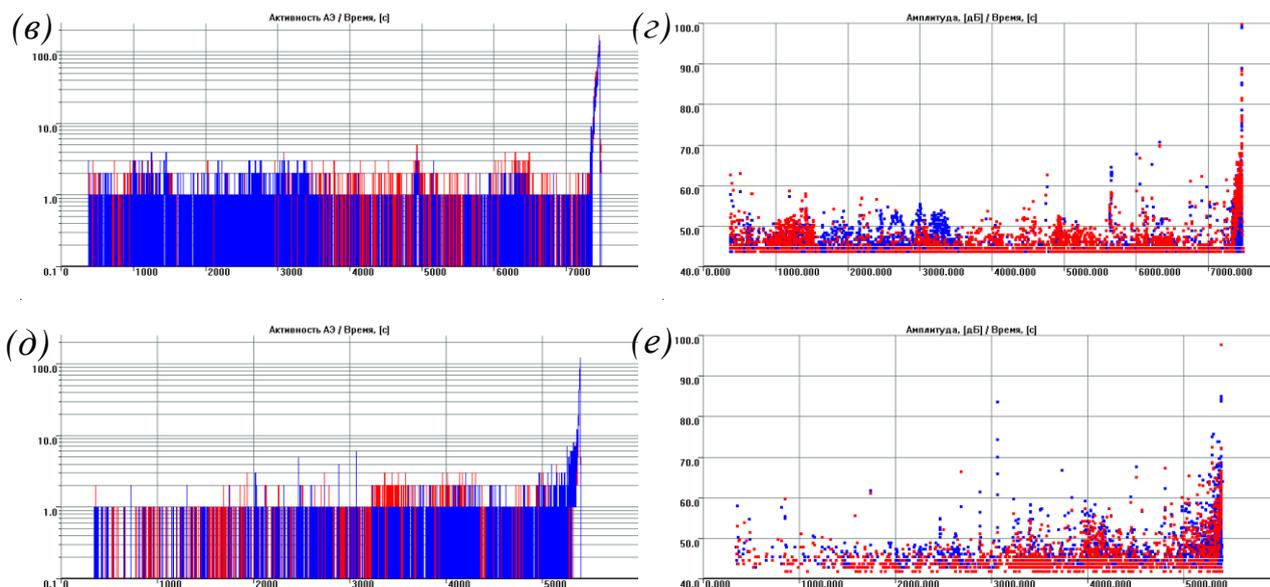
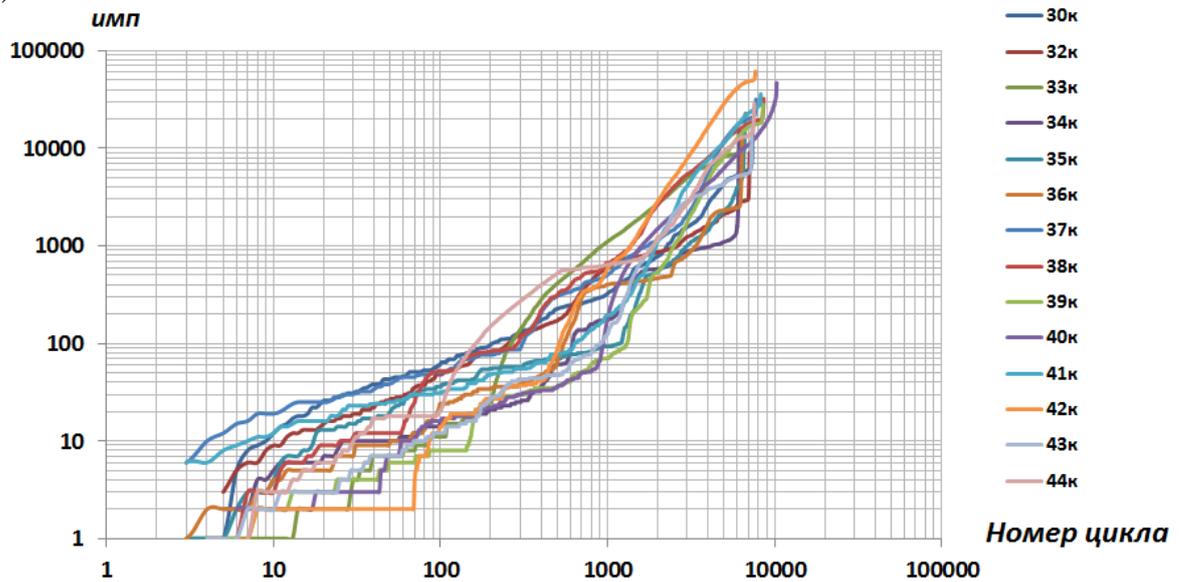


Рисунок 3.5 – Сопоставление значений стандартных АЭ параметров, зарегистрированных при максимальной нагрузке цикла 23 кН (а, б), 21 кН (в, г) и 19 кН (д, е)

Как показано на рисунке 3.5, закономерности изменения АЭ данных, соответствуют форме КДУР (рис. 3.1). Импульсы АЭ можно разделить на две временные области. Первая область соответствует стабильному росту усталостной трещины. Для нее характерна низкая активность возникновения импульсов АЭ, амплитуда которых с вероятностью 95% не превышает 60 дБ, а значение средней активности остается на уровне 1-5 имп/цикл. Отмечается, что такого рода параметры акустических сигналов зарегистрированы для всех значений параметра P_{max} , что согласуется с результатами, приведенными на рисунке 3.1. Дальнейшее нагружение образца приводит к появлению дефекта критических размеров и локализации области разрушения, что приводит к кратковременному снижению активности импульсов АЭ. На этапе ускоренного развития дефекта уровень АЭ активности и максимальных амплитуд резко возрастает. Интенсивное разрушение образца приводит к увеличению области пластической деформации в вершине трещины и появлению акустических сигналов, амплитуда которых достигает 102 дБ. На рисунке 3.6 приведены кумулятивные АЭ параметры – амплитуда и энергия,

соответствующие процессу накопления повреждений на основных стадиях развития УТ.

(а) Суммарная АЭ, имп



(б) Суммарная энергия, дБ

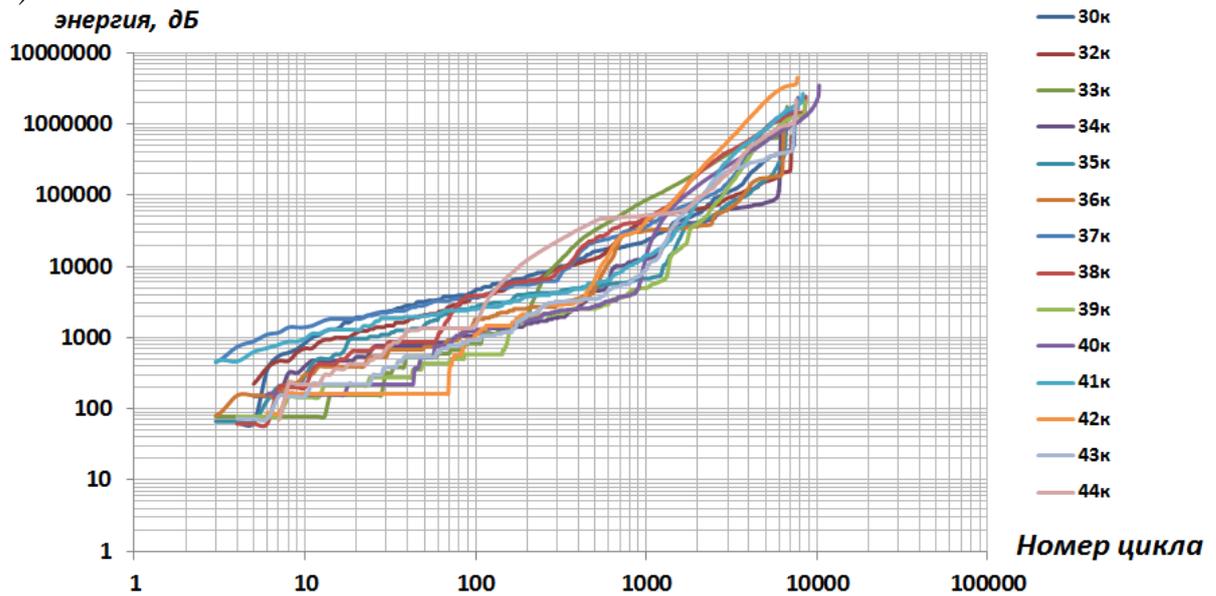


Рисунок 3.6 – Значения (а) суммарной АЭ и (б) энергии акустических сигналов, зарегистрированных при испытании образцов с различным уровнем максимальной нагрузки

Характер зависимостей, соответствующих различным значениям P_{max} схож между собой. При этом изменение их формы согласуется с

диаграммами, показанными на рисунке 3.1. На стадии устойчивого роста трещины наблюдается линейный, относительно медленный характер накопления кумулятивных АЭ параметров, на стадии ускоренного роста скорость накопления энергии и амплитуд резко возрастает.

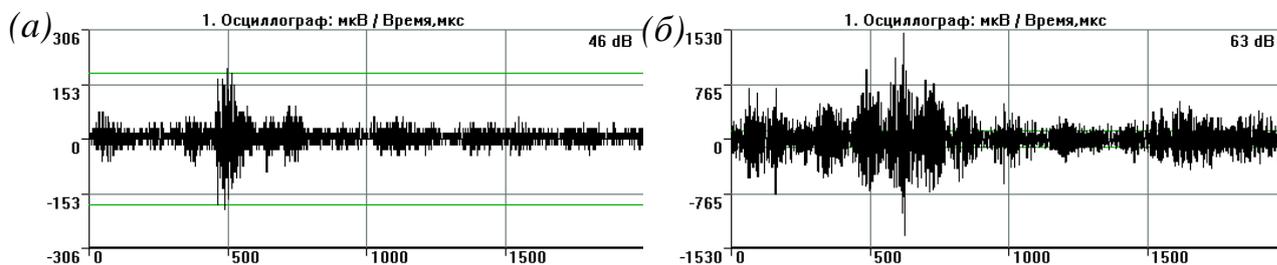


Рисунок 3.7 – Сопоставление формы и спектров акустических сигналов, зарегистрированных на этапах (а, б) стабильного и (в, г) ускоренного роста трещины

Как показано на рисунке 3.7, существуют различия между формами импульсов АЭ, зарегистрированных на основных этапах развития УТ. Для стадии стабильного роста дефекта характерна регистрация дискретного потока акустических сигналов малой амплитуды и длительности. Дальнейшее развитие дефекта приводит к возникновению импульсов АЭ, форма которых приведена на рисунке 3.7б. Следует отметить, что увеличение деформированного объема и высвобождение большего количества акустической энергии в процессе образования новых поверхностей приводит к повышению амплитуды импульса АЭ. Таким образом, в процессе интенсивного накопления внутренних повреждений может быть зарегистрирована непрерывная АЭ, возникающая в основном при развитии катастрофически опасных дефектов.

3.3 Анализ влияния максимального напряжения цикла, частоты циклов и R- отношения на средние значения АЭ параметров

Одним из наиболее важных аспектов проводимого исследования является определение взаимосвязей между параметрами нагружения и АЭ. Для ее решения используются возможности дисперсионного анализа, позволяющего определить влияние различного рода факторов на значения

случайной величины путем сопоставления F-отношения с критическим значением с заданным уровнем достоверности. Расчет F-отношения осуществляется по приведенной ниже формуле:

$$F = \frac{MS_D}{MS_R}, \quad (3.1)$$

где MS_D – дисперсия, вызванная влиянием фактора (межгрупповая дисперсия) MS_R – дисперсия, вызванная разбросом значений (внутригрупповая дисперсия). При выполнении условия $p > 0,05$ принимается гипотеза, указывающая на отсутствие влияния фактора.

В рамках исследования параметров акустических сигналов при нагружении образцов с различной частотой было отмечено, что среднее значение амплитуды изменяется в узком диапазоне 45,94-46,83 дБ. При этом количество импульсов АЭ за цикл нагружения (N_c) может изменяться от 1,53 до 2,26 имп/цикл. При оценке влияния фактора частоты были получены следующие результаты.

Таблица 3.1 Влияние фактора частоты нагружения на значения АЭ параметров

АЭ параметр	F-отношение (p-значение)	Вывод
u_m	0,97 (0,41)	не влияет
N_c	0,46 (0,64)	не влияет

При рассмотрении таких факторов как максимальная амплитуда (P_{max}) и коэффициент асимметрии цикла (R) отмечается, что значение средней амплитуды изменялось в диапазонах 45,62-46,75 дБ и 45,13-45,97 дБ соответственно. Средние значения N_c изменяются незначительно и не превышают 3,14 имп/цикл. В таблице 3.2 приведены значения F-отношений в зависимости от перечисленных выше факторов.

Таблица 3.2 Влияние факторов P_{max} и R на значения АЭ параметров

Максимальная амплитуда цикла (P_{max})		
АЭ параметр	F-отношение (p-значение)	Вывод
u_m	0,74 (0,49)	не влияет
N_c	2,77 (0,085)	не влияет
Коэффициент асимметрии цикла (R)		
АЭ параметр	F-отношение (p-значение)	Вывод
u_m	0,6 (0,58)	не влияет
N_c	0,4 (0,69)	не влияет

По результатам, приведенным в таблицах 3.1 и 3.2, необходимо отметить, что параметры схемы нагружения не оказывают существенного влияния на характеристики акустических сигналов.

3.4 Влияние ориентации усталостной трещины на параметры потока АЭ данных

В результате проведения лабораторных испытаний по циклическому нагружению металлических образцов с боковым надрезом наблюдается значительный разброс АЭ параметров и измерение структуры материала. При обработке стандартных АЭ параметров выявлено несколько особенностей, возникающих независимо от схемы нагружения.

Отклонение параметров АЭ от средних значений, которое наблюдается в ряде экспериментов, объясняется влиянием микроструктуры исследуемого металла. Фрактографический анализ, проведенный в рамках данного исследования, показывает, что вторичными источниками АЭ, создающими дополнительную АЭ активность, могут быть неметаллические включения, присутствующие в металле, расслоения, а также трение берегов УТ (эффект Элбера) [94].

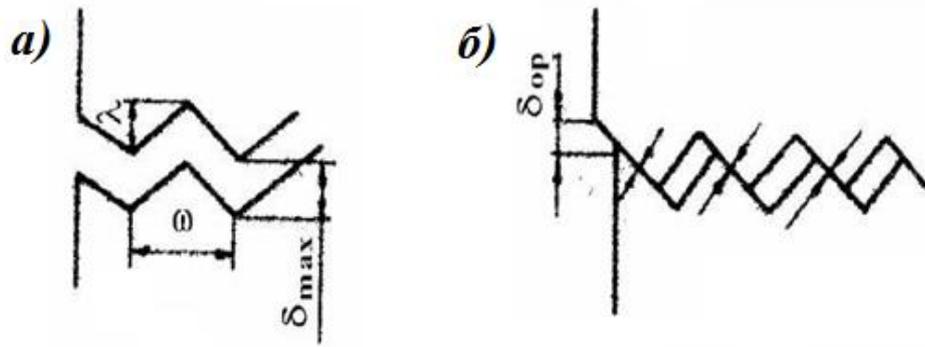


Рисунок 3.8 – Возникновение «вторичных» источников АЭ при трении берегов УТ

На рисунке 3.9 приведены значения стандартных АЭ параметров, зарегистрированных при испытании образца 40к.

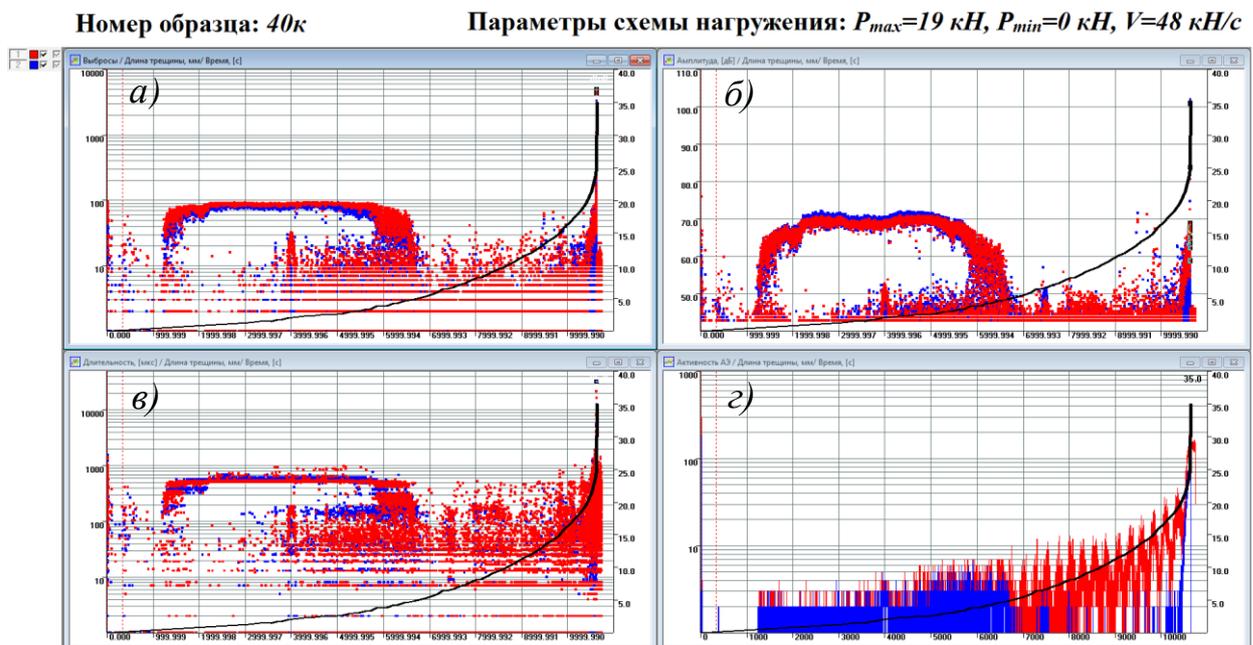


Рисунок 3.9 – Значения стандартных АЭ параметров, зарегистрированных при нагружении образца 40к

Показанные на рисунке 3.9 временные зависимости отражают: а) количество выбросов (N_s); б) длительность зарегистрированных импульсов (t_u); в) амплитуду акустических сигналов (A); г) активность импульсов АЭ (N). Как следует из графиков 3.7а, б, в испытание образца можно разделить на два временных интервала. От начала проведения испытаний до 6800 секунды регистрируется поток АЭ данных, нехарактерный для усталостного разрушения металла. На 1250 секунде отмечается резкое повышение

длительности и амплитуды акустических сигналов до значений 600 мкс и 67 дБ соответственно. При рассмотрении графика 3.7с во временном интервале с 2000 до 6000 секунды можно выделить два процесса. К первому процессу относится поток импульсов АЭ с амплитудами 65-72 дБ, второму процессу соответствуют акустические сигналы амплитудой менее 55 дБ. При этом их результирующая активность не превышает 6 имп/с. Дальнейшее нагружение приводит к снижению активности первого процесса до нулевого значения.

С 6800 секунды разрушение образца с точки зрения АЭ параметров протекает по типичному сценарию – значительное повышение активности и максимальной амплитуды акустических сигналов. Предполагается, что нетипичный характер потока АЭ данных связан с возникновением дефектов, развивающихся в продольном направлении относительно приложенной нагрузки. На рисунке 3.10 показаны изображения усталостных трещин, зарегистрированных на различных этапах нагружения.

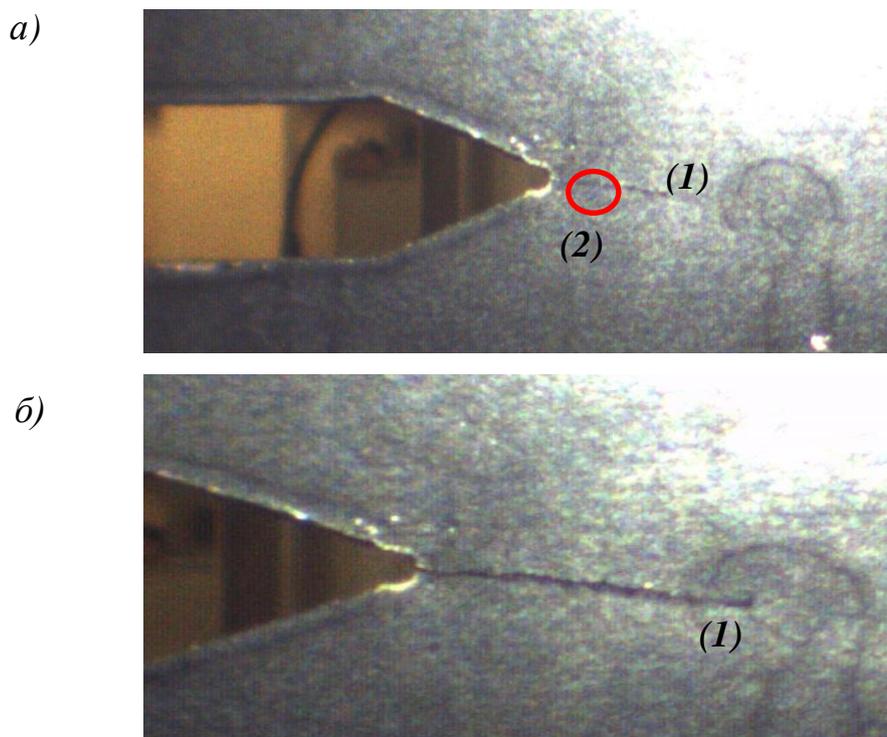


Рисунок 3.10 – Изображение усталостных трещин на (а) 4225 и (б) 7089

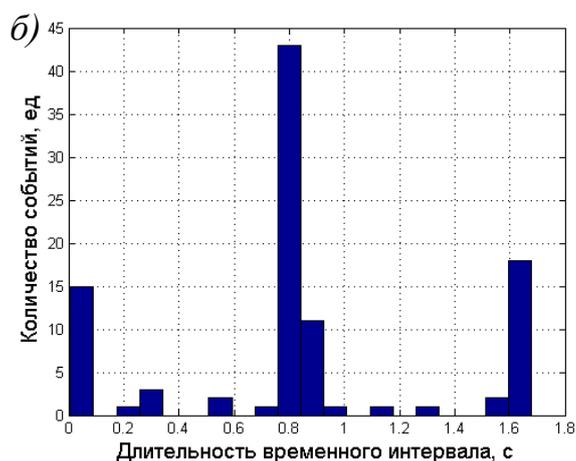
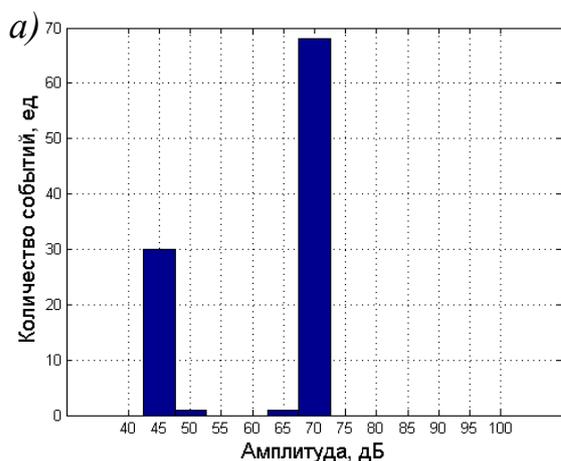
секундах эксперимента

(1) магистральная трещина

(2) «вторичные» трещины

На рисунке 3.10 приведены изображения поверхностей образца 40к, зарегистрированных в рамках лабораторных испытаний. Необходимо отметить, что размер пасынковой трещины не превышал 0,15 мм. Основной причиной его возникновения можно считать низкий уровень прочности структурных элементов материала, расположенных в плоскости ортогональной относительно фронта распространения усталостной трещины. Появление таких дефектов влечет за собой перераспределение напряженно-деформированного состояния металла и возникновение дополнительных источников АЭ. На рисунке 3.10а приведена фотография поверхности образца на 4225 секунде эксперимента. В этот момент времени амплитуды акустических сигналов достигали значения 72 дБ. Дальнейшее воздействие циклических нагрузок привело к росту усталостной трещины и перераспределению напряженно-деформированного состояния металла. На 6123 секунде эксперимента амплитуда импульсов АЭ, возникающих при трении берегов УТ, не превышала 65 дБ. На рисунке 3.8б приведена поверхность образца, зарегистрированная на 7089 секунде эксперимента, в этот момент АЭ сигналы, вызванные трением берегов трещины, либо отсутствуют, либо не превышают порогового значения 40дБ.

Для выявления акустических сигналов, возникающих при трении берегов УТ, необходимо провести оценку формы распределений стандартных АЭ параметров. На рисунке 3.11 показаны формы распределений амплитуд и временных интервалов между соседними импульсами.



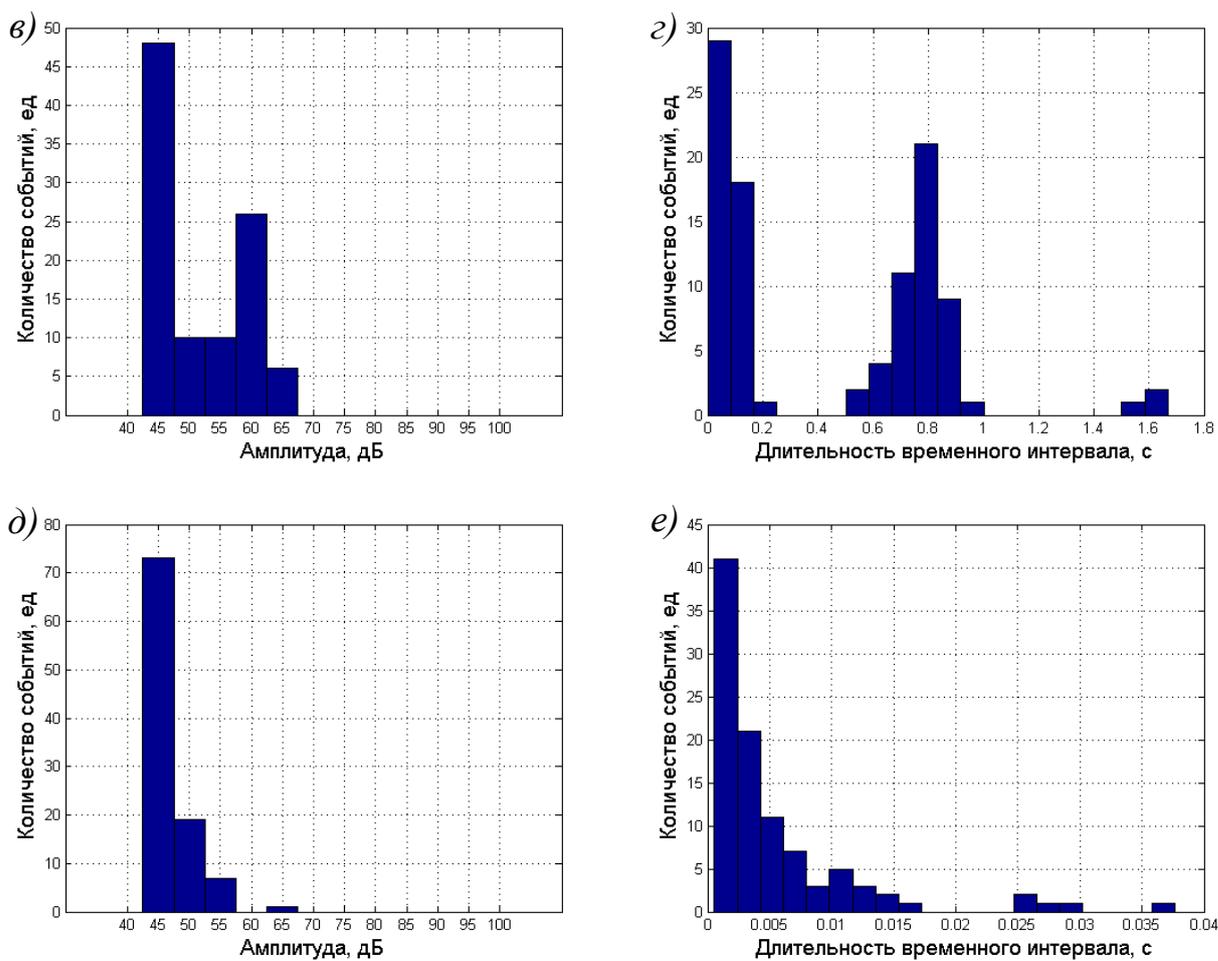


Рисунок 3.11 – Форма распределений параметров амплитуды (*a*, *в*, *д*) и временных интервалов между соседними импульсами АЭ (*б*, *г*, *е*)

На рисунке 3.11 показаны распределения, построенные по 100 значениям АЭ параметров на 4225 (рис. 3.11*а*, *б*), 6123 (рис. 3.11*в*, *г*), 10600 (рисунки 3.9*д*, *е*) секундах эксперимента по циклическому нагружению металлического образца. На 4225 секунде нагружения регистрируется множество высокоамплитудных импульсов АЭ (рис. 3.9*б*), амплитудное распределение (рисунки 3.11*а*) которых характеризуется двумя модами – 45 дБ и 70 дБ. А распределение временных интервалов тремя, равными 0,25, 0,8 и 1,65 секундам соответственно, что нехарактерно для потока акустических сигналов, возникающих при циклическом нагружении металлических образцов. На 6123 секунде эксперимента отмечается снижение активности процесса трения, что подтверждается зависимостями 3.9*в* и 3.9*г*. Координата второго пика амплитудного распределения уменьшилась до 60 дБ. При этом

генерации акустических сигналов «вторичным» источником и размером усталостной трещины. Чем меньше размер усталостной трещины, тем медленнее протекает процесс перераспределения напряженно-деформированного состояния металла, что увеличивает длительность процесса трения берегов. Как отмечалось ранее, этот процесс характеризуется определенной формой амплитудных распределений, вид которых показан на рисунке 3.13.

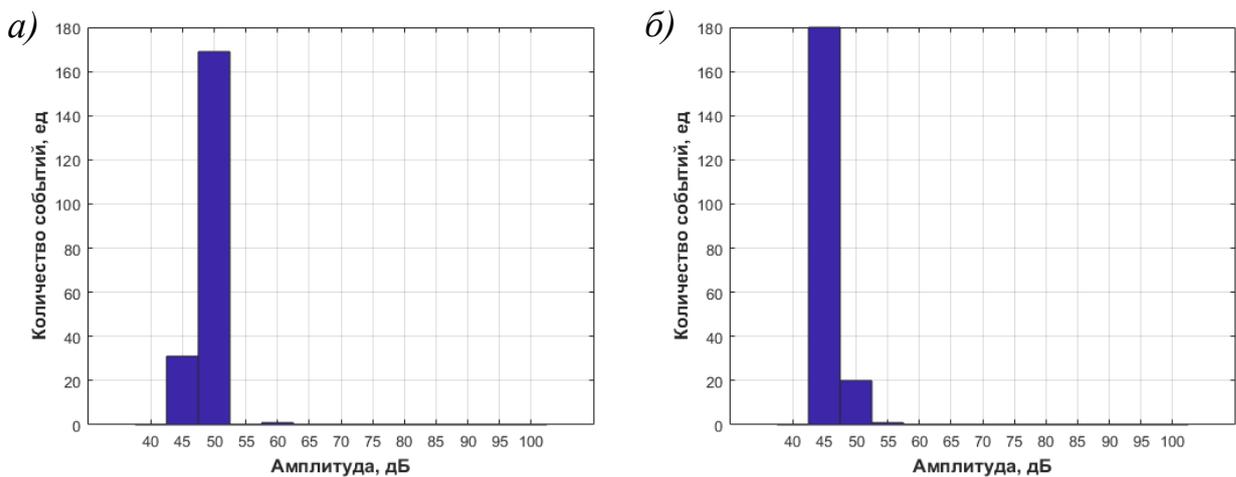


Рисунок 3.13 – Сопоставление формы амплитудных распределений, зарегистрированных на (а) 850 и (б) 5500 секундах эксперимента

На начальном этапе нагружения образца большая часть акустических сигналов соответствует процессу трения берегов УТ. Из-за её малых размеров амплитуда возникающих импульсов АЭ не превышает 50 дБ (рис. 3.13а). При дальнейшем развитии дефекта отмечается снижение интенсивность процесса трения и основным источником АЭ становится развитие магистральной трещины (рис. 3.13).

3.5 Влияние структурных неоднородностей металла на параметры потока АЭ данных

Дополнительным фактором, влияющим на кинетику накопления усталостных повреждений и значения стандартных АЭ параметров, является наличие структурных неоднородностей материала. Для их выявления проведен металлографический анализ стали 09Г2С, используемой в лабораторных испытаниях. Результаты анализа приведены на рисунке 3.14.

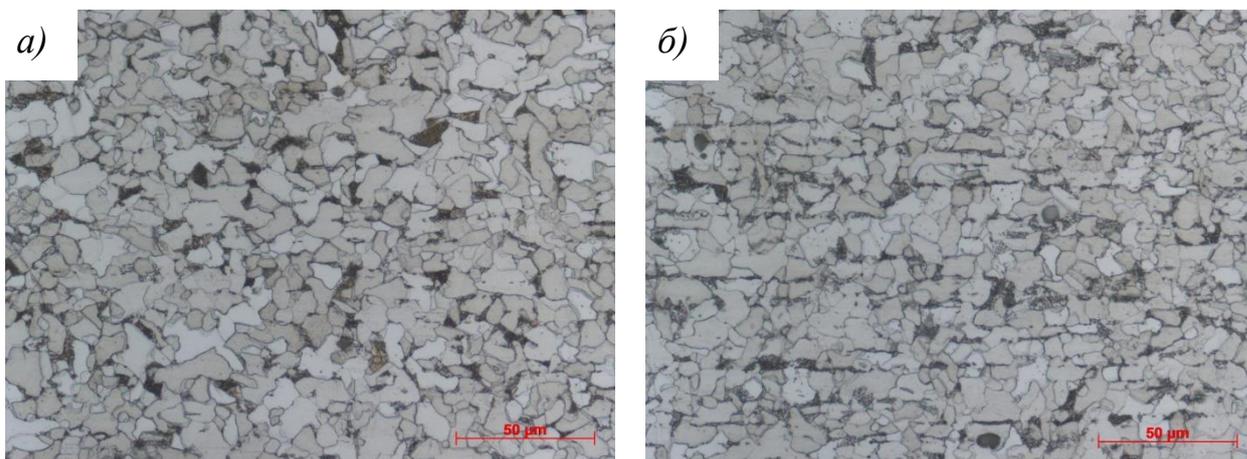


Рисунок 3.14 – Микроструктура металла вблизи поверхности (*а*) и в центральной части листа (*б*) при увеличении 800х

На рисунке 3.14*а* представлены микрофотографии металла вблизи поверхности, а на рисунке 3.14*б* – в центральной части листа. Установлено, что микроструктура металла представляет собой феррит и перлит. Вблизи поверхности она является однородной, форма зерен близка к равноосной. В центральной части листа наблюдаются явно выраженные вытянутые в направлении проката зерна перлита. Такие полосы могут быть причиной появления внутренних расслоений металла при воздействии на образец циклических нагрузок. Необходимо отметить, что развитие расслоений является не единственной причиной влияющей на характеристики потока акустических сигналов. Также на значения стандартных АЭ параметров значительное влияние оказывают неметаллические включения, присутствие которых также было установлено при фрактографическом анализе.

3.5.1 Влияние неметаллических включений на результаты АЭ диагностики

Неметаллические включения оказывают существенное влияние на локальные процессы деградации материала, например, являются естественным барьером для развития усталостной трещины или концентратором внутренних напряжений, повышающим скорость развития дефекта. От присутствия неметаллических включений зависят не только прочностные свойства материала, но и параметры потока акустических

сигналов, возникающих при развитии УТ. На рисунке 3.15 показан результат микрофотографии поверхности слома образца.

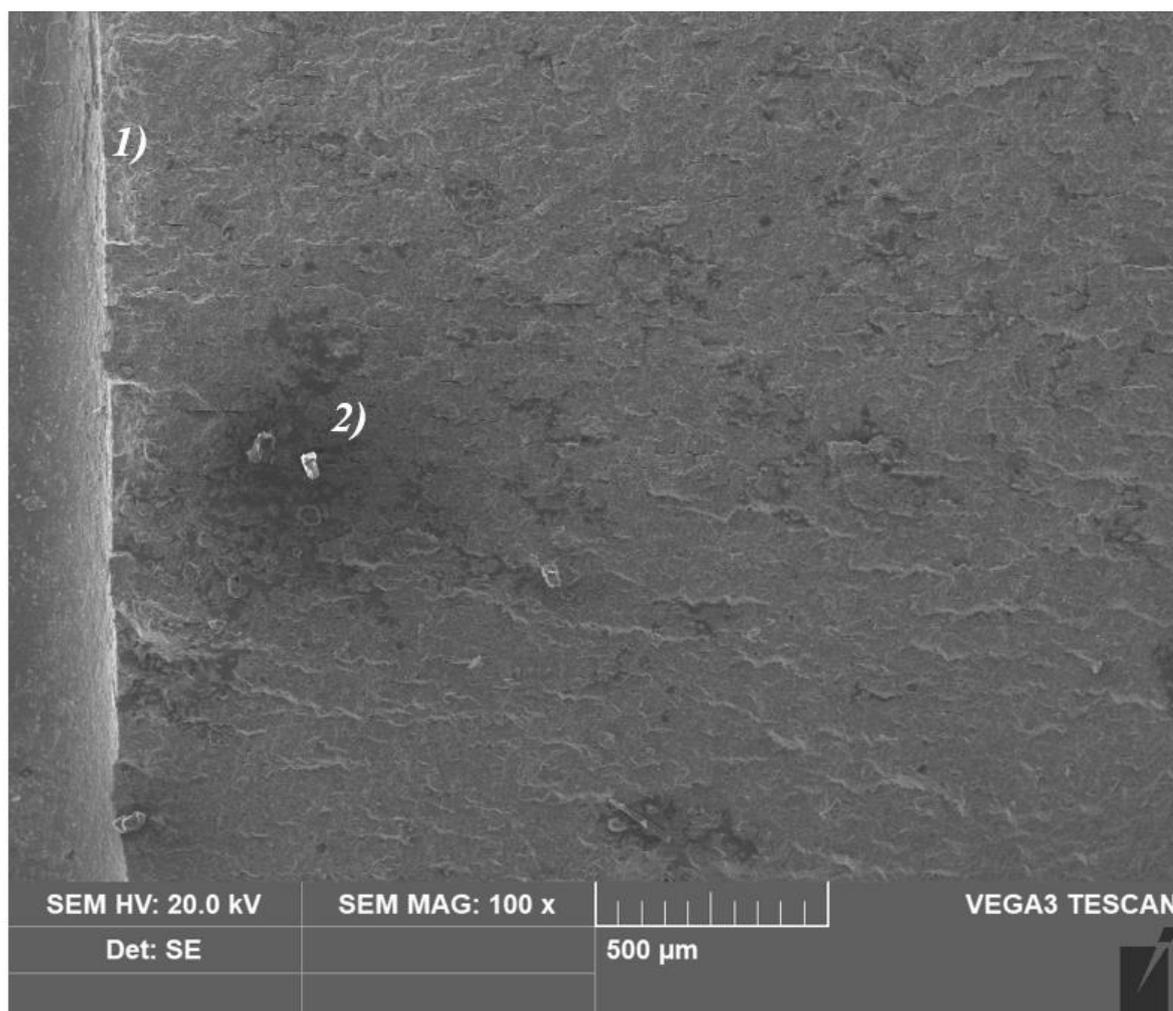


Рисунок 3.15 – Изображение поверхности слома металлического образца, подверженного циклическому нагружению до разрушения;

- 1) – граница концентратора напряжений
- 2) – неметаллическое включение

На рисунке 3.15 зарегистрировано присутствие неметаллического включения вблизи границы концентратора напряжения. Размер такого дефекта достигает 50x50 мкм, что может существенно повлиять на значения стандартных АЭ параметров (рис. 3.15).

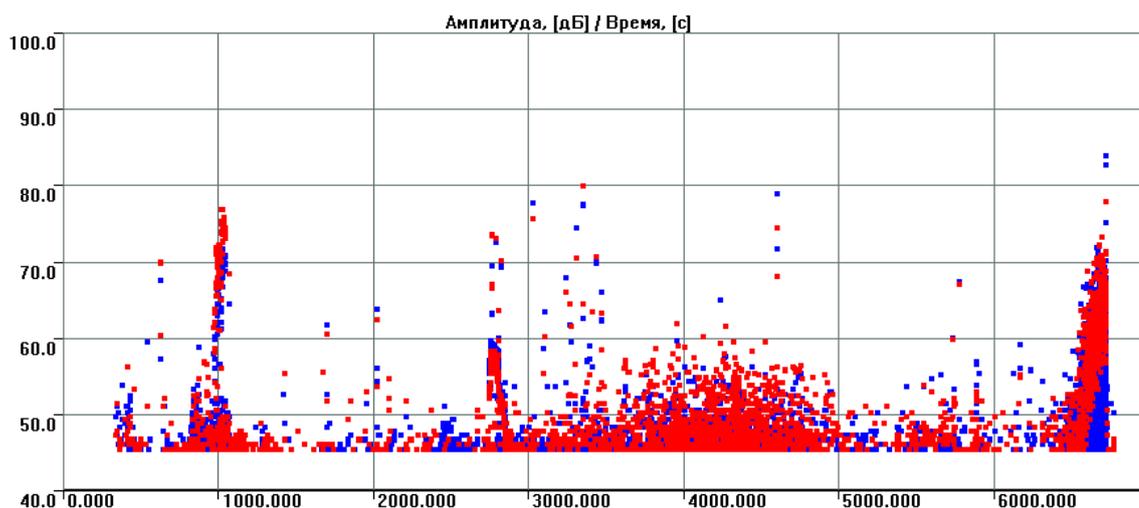


Рисунок 3.16 – Значения амплитуды АЭ сигналов, зарегистрированных при нагружении металлического образца, содержащего металлические включения больших размеров

При сопоставлении результатов микроскопии (рис. 3.14) и АЭ контроля (рис. 3.16) можно обнаружить следующие закономерности. На начальном этапе роста УТ был зарегистрирован поток акустических сигналов, амплитуда которых не превышала 70 дБ. Как известно [20] неметаллические включения разрушаются хрупко, при этом амплитуда импульсов АЭ локально возрастает. Иллюстрацией такого процесса является рисунок 3.14б. На зависимости амплитуд импульсов АЭ от времени локально наблюдается значительное повышение импульсов АЭ до 80 дБ. Подобное повышение амплитуды свидетельствует о присутствии неметаллических включений и не является нехарактерным для этапа стабильного роста УТ. Таким образом, при проведении АЭ диагностики стальных конструкций необходимо учитывать возможное влияние неметаллических включений на параметры импульсов АЭ.

3.5.2 Совместное влияние неметаллических включений и расслоений на результаты АЭ диагностики

При циклическом нагружении малоуглеродистых сталей могут возникать расслоения, связанные с полосчатостью перлитной структуры

металла. На рисунке 3.17 изображен результат исследования поверхности слома образца с учетом возникающих расслоений.

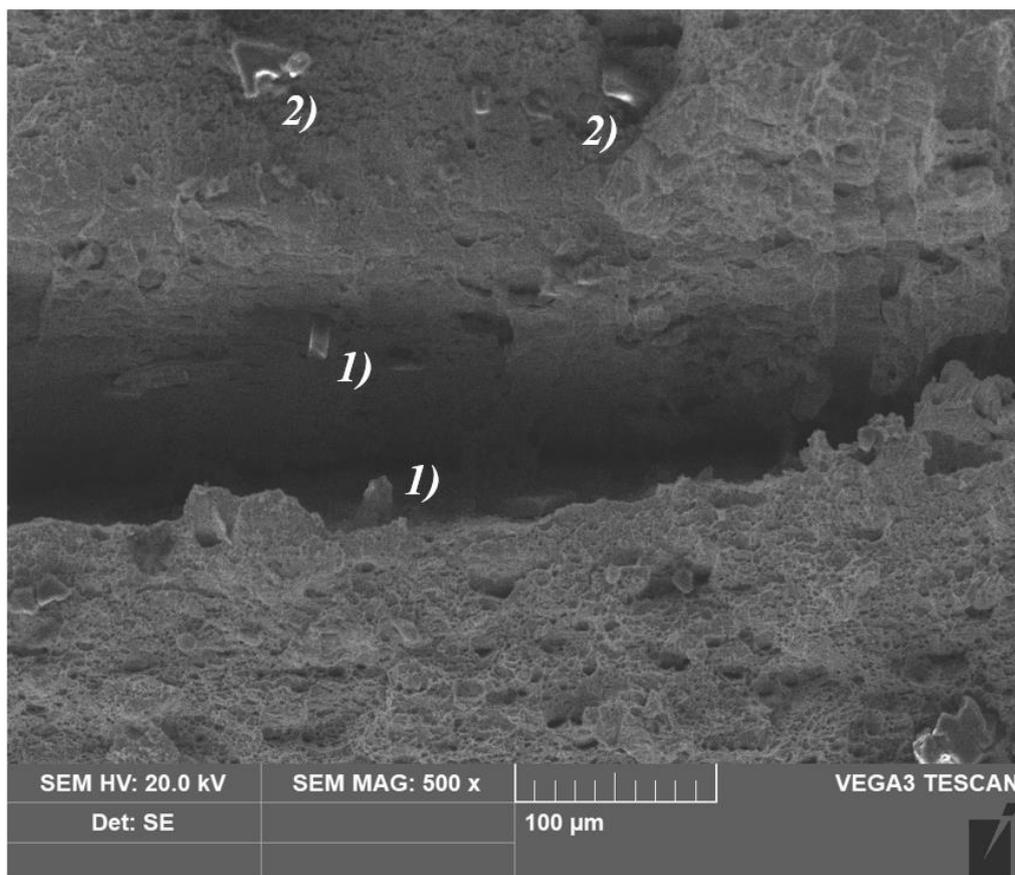


Рисунок 3.17 – Изображение поверхности слома металлического образца, подверженного циклическому нагружению до разрушения;

1) – металлические включения внутри расслоения

2) – неметаллическое включение на поверхности слома

Как показано на рисунке 3.17, неметаллические включения располагаются как на поверхности слома, так и внутри расслоений, появление которых связано с присутствием перлитной составляющей структуры металла. При воздействии циклических нагрузок возможно возникновение процесса трения берегов и «вторичных» источников акустических сигналов. На рисунке 3.18 представлены значения стандартных АЭ параметров, возникающих при появлении такого рода дефектов.

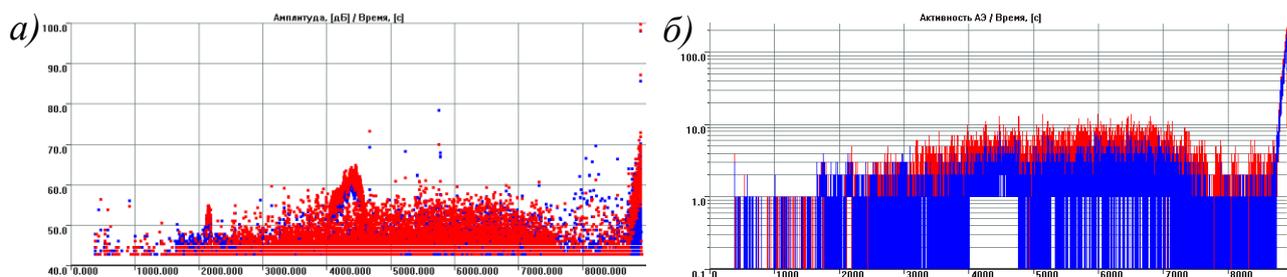


Рисунок 3.18 – Значения (а) амплитуды и (б) активности импульсов АЭ, зарегистрированных при нагружении металлического образца с характерными дефектами структуры металла

По приведенным на рисунке 3.18 результатам можно выделить следующие особенности АЭ данных. На зависимости амплитуды акустических сигналов от времени (рис. 3.18а) отмечается два локальных выброса. Первый соответствует 2100 секунде, на которой отмечен кратковременный скачок значений стандартных АЭ параметров. Аналогичный результат был получен на рисунке 3.16, что согласуется с влиянием неметаллических включений на кинетику накопления усталостных повреждений. На временном интервале с 4000 по 4800 секунду отмечается плавное повышение амплитуды акустических сигналов от 55 дБ до 65 дБ, при этом значение АЭ активности превышает 10 имп/цикл (рис. 3.18б). Этот процесс можно связать с трением берегов расслоения, внутри которого располагаются неметаллические включения. Таким образом, дефекты структуры металла могут приводить к появлению дополнительных источников акустических сигналов, усложняющих процедуру обработки АЭ данных.

3.5.3 Влияние расслоений на результаты АЭ диагностики

На заключительном этапе исследования особенностей структуры материала проведено изучение характеристик потока АЭ данных, зарегистрированных при возникновении расслоений. Как было отмечено ранее, причиной их появления являются зерна перлита, вытянутые в направлении проката. На рисунке 3.19 представлены характерные

изображения расслоений, полученных при исследовании микроструктуры поверхности слома.

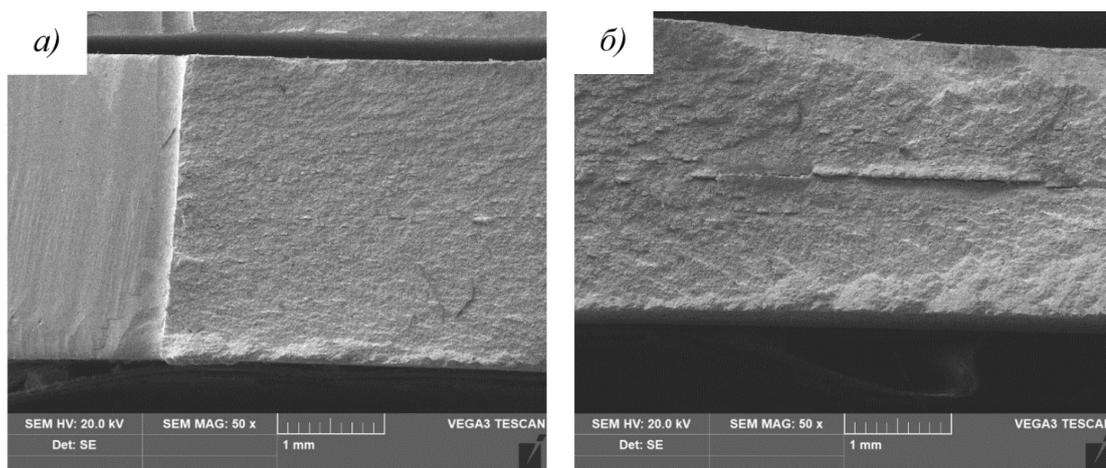


Рисунок 3.19 Сопоставление расслоений размером (а) 200 мкм и (б) 2 мм, зарегистрированных на этапе стабильного роста усталостной трещины

На рисунке 3.19а приведено изображение расслоений, зарегистрированных на начальном этапе развития УТ. Из-за низкого уровня возникающих напряжений, размер дефектов не превышает 200 мкм. Дальнейшее нагружение металлического образца привело к повышению уровня внутренних напряжений и образованию расслоения существенно большего размера. Таким образом, с развитием УТ повышается не только интенсивность процесса накопления усталостных повреждений, но и масштаб структурных дефектов, возникающих при циклическом нагружении металлического образца. На рисунке 3.20 приведены основные АЭ параметры, характерные для рассмотренных выше процессов.

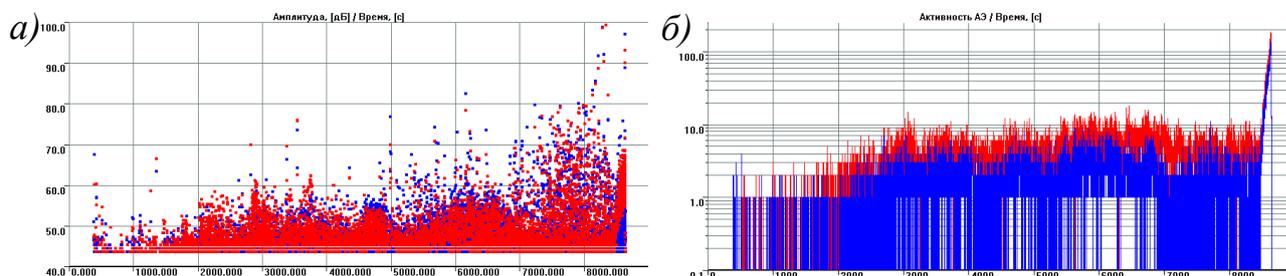


Рисунок 3.20 – Значения (а) амплитуды и (б) активности импульсов АЭ, зарегистрированных при развитии в металлическом образце расслоений различных размеров

Как показано на рисунке 3.20, процесс регистрации акустических сигналов можно разделить на несколько характерных этапов. При рассмотрении временного интервала от начала нагружения до 1000 секунды отмечается появление низкоамплитудного потока импульсов АЭ, активность которых не превышает 3 имп/цикл (рис. 3.20б). При низких уровнях внутренних напряжений (до 1000 секунды) зарегистрированы расслоения малого размера, возникновение и развитие которых не изменяет параметры потока акустических сигналов амплитудой менее 70 дБ (рис. 3.20а). Дальнейшее нагружение образца приводит к появлению дефектов структуры материала больших размеров, достигающих нескольких миллиметров (рис. 3.17б). При этом отмечается повышение значений стандартных АЭ параметров, например, на этапе стабильного роста УТ зарегистрирован нехарактерно высокий уровень АЭ активности, превышающий 10 имп/цикл. Таким образом, дефекты структуры материала (неметаллические включения и расслоения) могут оказать значительное воздействие на параметры акустических сигналов, возникающих в рамках диагностики состояния промышленных объекта, а следовательно, влиять на методику АЭ мониторинга.

3.6 Исследование анизотропии акустических свойств металлических изделий

Согласно результатам экспериментальных исследований, приведенных в пункте 3.4, параметры потока акустических сигналов, возникающих при развитии УТ, зависят от множества факторов. При этом следует обратить особое внимание на анизотропию акустических и прочностных свойств материалов, используемых в промышленности. Как показано на рисунке 3.14, в зависимости от направления проката структурные характеристики стали могут значительно отличаться. На рисунке 3.21 приведены результаты АЭ диагностики металлических образцов, производство которых проводилось в продольном и поперечном направлении относительно расположения перлитных полос.

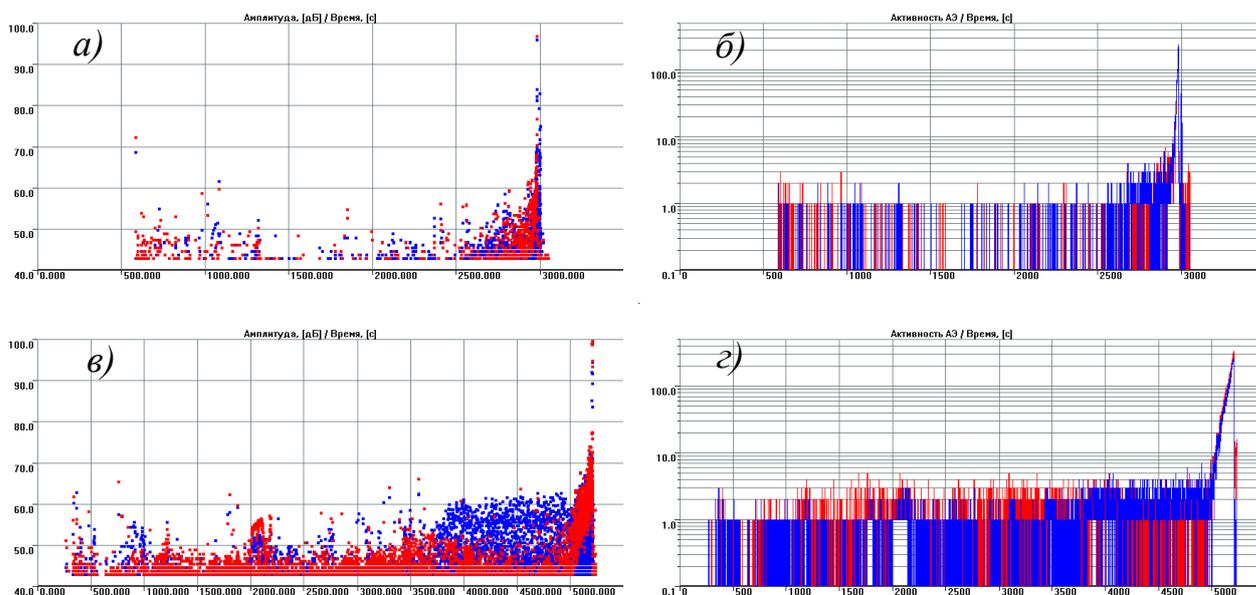


Рисунок 3.21 – Зависимости (а, в) амплитуды акустических сигналов и (б, г) АЭ активности от времени, зарегистрированные при циклическом нагружении металлических образцов

На рисунках 3.21а, б приведены значения стандартных АЭ параметров, зарегистрированные при нагружении металлического образца, для которого направление проката совпадало с вектором приложенной нагрузки. На этапе стабильного роста трещины наблюдается поток низкоамплитудных акустических сигналов малой активности, большая часть которых возникает при развитии основного дефекта. При переходе к этапу ускоренного роста УТ значения стандартных параметров значительно возрастает. На рисунках 3.21б, г приведены результаты АЭ диагностики металлического образца, для которого вектор растягивающей нагрузки приложен в поперечном направлении относительно проката. В этом случае анизотропия акустических и прочностных характеристик проявляется в большей степени. На участке стабильного роста усталостной трещины наблюдается повышение АЭ активности до 4 имп/цикл. При этом на участке ускоренного роста дефекта параметры потока АЭ данных схожи между собой независимо от направления проката. Таким образом, анизотропия акустических и механических свойств объекта контроля оказывает существенное влияние на результаты АЭ диагностики. В основном этот процесс проявляется при

обработке акустических сигналов, возникающих на этапе стабильного роста УТ.

3.7 Выводы

В рамках раздела проведено исследование влияния параметров нагружения и структурных неоднородностей материала как на кинетику развития УТ, так и на значения стандартных АЭ параметров. По результатам лабораторных экспериментов проведено построение кинетических диаграмм, формы которых можно аппроксимировать при помощи кусочно-линейной функции. Проведено сопоставление основных участков КДУР и параметров потока акустических сигналов. Отмечено, что этап стабильного роста дефекта характеризуется низкоамплитудным потоком импульсов АЭ, для которых значение N_c не превышает 5 имп/цикл, а амплитуда с вероятностью 95% оказывается менее 60дБ.

Результаты дискриминантного анализа показывают, что средние значения АЭ параметров с вероятностью 95% не зависят от значений максимальной нагрузки цикла (P_{max}), коэффициента асимметрии цикла (R) и частоты нагружения (f). Проведено исследование «вторичных» источников АЭ, возникающих в процессе ветвления УТ. Причиной их возникновения служит неоднородность структуры металла, приводящая к перераспределению внутренних напряжений и появлению «вторичных» источников. Характерной особенностью таких источников является локализованное во времени повышение амплитуд импульсов АЭ до 80дБ или повышение активности АЭ процесса более 10 имп/с. В рамках решения поставленной задачи также изучена степень влияния дефектов структуры металла и анизотропии акустических свойств объекта контроля на результаты АЭ диагностики.

4 Обнаружение и классификация УТ по результатам АЭ диагностики

Среди различных методов неразрушающего контроля, метод АЭ – является наиболее сложным с точки зрения обработки данных. Сложность интерпретации данных АЭ объясняется – диагностическим характером метода АЭ, большим количеством мешающих и влияющих факторов, особенностями источников АЭ, принципиальной стохастичностью сигнала АЭ. Поэтому диагностическая информация, полученная в результате контроля, в большей степени стохастична, и в меньшей предсказуема. Активный источник АЭ генерирует поток данных, содержащий порядка сотен импульсов, имеющих случайные параметры. Поэтому, одной из целей анализа данных является выбор информативных параметров АЭ, позволяющих наиболее точно оценить техническое состояние промышленных объектов, подверженных квазистатическим или динамическим нагрузкам.

В настоящей главе анализируются статистические распределения параметров АЭ сигналов, полученных в результате экспериментов. Приводятся характерные значения параметров распределений, соответствующих выделенным ранее стадиям развития дефекта.

Во второй части раздела показаны параметры акустических сигналов, зарегистрированных при испытании образцов с различного рода структурными неоднородностями. Исследуются особенности АЭ сигналов, приводящие к ложным результатам диагностики состояния контролируемых изделий. На основе этих результатов разработан алгоритм разделения основных стадий развития УТ, а также проведен расчет вероятности выявления дефекта с учетом свойств акустического тракта.

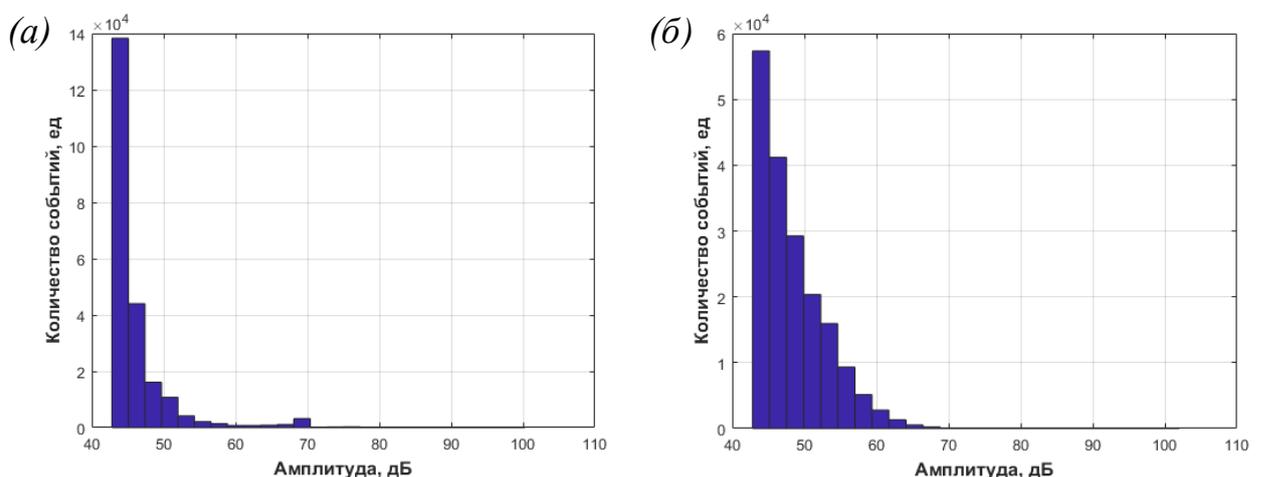
4.1 Описание данных акустической эмиссии

Сигнал АЭ характеризует стохастический процесс, генерации упругих волн, случайные свойства которого определяются параметрами неоднородной структуры материала. Поскольку для прогнозирования

долговечности и прочности конструкции используются стохастические модели, применение статических методов анализа АЭ данных также является оправданным. Основным достоинством такого подхода является возможность построения статистических моделей, определяющих закономерности между случайными величинами, такими как параметры акустических сигналов, и стадиями развития УТ. Процесс обработки АЭ данных включает в себя изучение формы распределения случайной величины, расчет статистик, а также оценку влияния мешающих факторов.

С точки зрения статистического анализа, результат каждого эксперимента, описанного в разделе 3, является реализацией случайного АЭ процесса. А совокупность всех экспериментов – выборка данных, характеризующая закономерности изменения АЭ параметров при развитии усталостной трещины. Принимая во внимание тот факт, что изменчивость АЭ данных объясняется в большей степени неоднородностью структуры материала, и незначительно зависит от детерминированных факторов, таких как максимальная нагрузка цикла, R-отношение и частота нагружения, при последующей обработке данные отдельных экспериментов были объединены в общую выборку отдельно для каждой стадии развития УТ.

На начальном этапе проведено изучение формы распределений максимальной амплитуды (u_m) и разности времен прихода между соседними импульсами АЭ (Δt). На рисунке 4.1 показаны результаты их построения для этапов стабильного и ускоренного роста УТ.



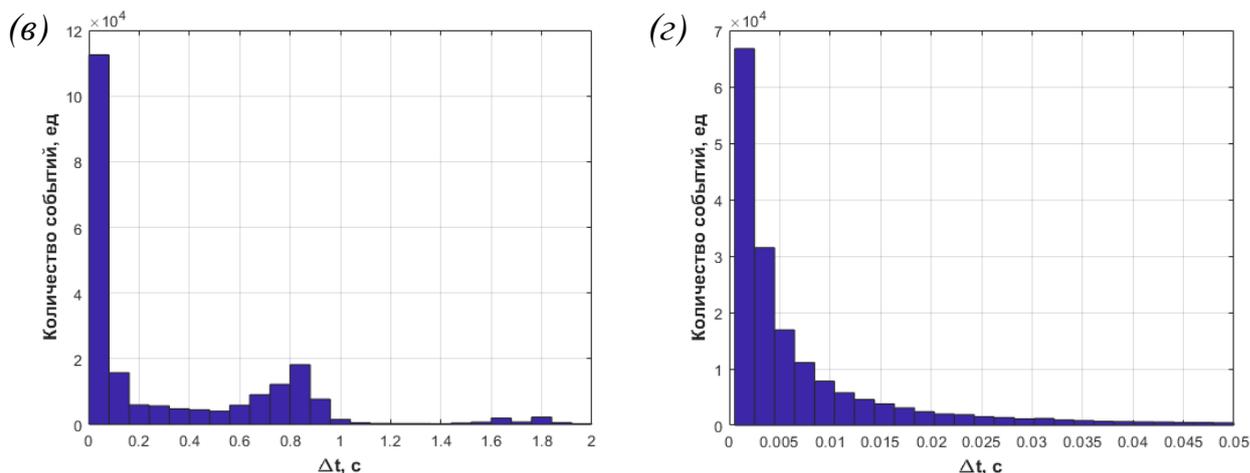


Рисунок 4.1 – Составление форм амплитудных (а, б) и временных (в, г) распределений, зафиксированных на основных этапах развития УТ

Как показано на рисунке 4.1 (а, в), на этапе стабильного роста УТ получен низкоамплитудный поток акустических импульсов с длительными временными интервалами между соседними импульсами АЭ. Следует отметить, что амплитуда большей части импульсов АЭ принадлежит интервалу от 40 до 60 дБ. При описании формы распределений необходимо обратить внимание на присутствие в распределениях амплитуды и временных интервалов второй моды, возникающих при появлении «вторичных» источников АЭ, подробное описание которых приведено в третьем разделе.

Для стадии ускоренного роста усталостной трещины характерно возникновение интенсивного потока акустических импульсов, амплитуда которых достигает 100 дБ. Активность АЭ значительно возрастает, а максимальное значение временных интервалов между соседними импульсами АЭ снижается более чем на порядок. При этом доля сигналов с амплитудой 50-60 дБ повышается с 7% до 29%. Также отмечается, что зарегистрированные распределения близки к экспоненциальной форме (рис. 4.1в, г). Для подробного количественного описания различий между АЭ параметрами, зарегистрированными на различных стадиях развития усталостного дефекта, необходимо провести расчет дополнительных статистических параметров. Для сравнительного анализа были выбраны

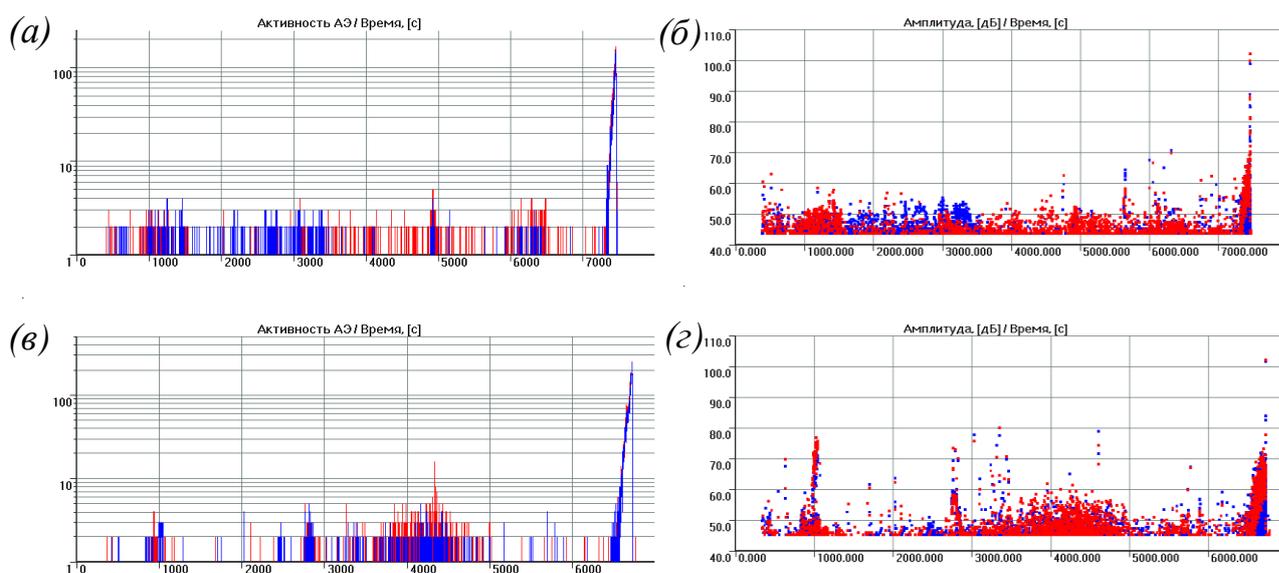
различные статистические параметры, такие как среднее значение случайной величины, среднеквадратическое отклонение (СКО), верхний квартиль и другие. В качестве случайных величин, описывающих изменения параметров АЭ сигналов, выбраны значения амплитуды, длительности, времени нарастания импульсов АЭ и параметр Δt – временной интервал между соседними импульсами. В таблице 4.1 приведены значения статистик для двух стадий развития УТ.

Таблица 4.1 – Сопоставление статистик распределений стандартных АЭ параметров

Статистика	Стандартные АЭ параметры			
	Амплитуда, дБ	Длительность, мкс	Время нарастания, мкс	Δt , с
<i>Этап стабильного роста УТ</i>				
Среднее значение	45,79	58,51	15,43	0,32
СКО	4,96	104,38	33,79	0,42
Нижний квартиль	42,8	1	1	0,017
Верхний квартиль	46,6	67	20	0,6718
<i>Этап ускоренного роста УТ</i>				
Среднее значение	48,19	207,13	82,03	0,0071
СКО	4,88	1147,5	651,75	0,009
Нижний квартиль	44,5	25	1	0,0016
Верхний квартиль	50,9	156	44	0,0085

В таблице 4.1 показано сопоставление параметров распределений параметров акустического анализа УТ, зарегистрированных на основных этапах развития УТ. Согласно проведенному исследованию на стадии стабильного роста дефекта регистрируются низкоамплитудные акустические сигналы, средняя амплитуда которых равна 45,79 дБ. Также отмечается низкий уровень АЭ активности, что подтверждается значением верхнего квартиля параметра Δt , не превышающим 0,68 с. Необходимо отметить, что значение верхнего квартиля соизмеримо с периодом следования циклов нагружения. При переходе к стадии ускоренного роста УТ характерно повышение СКО для параметров длительности и времени нарастания импульсов АЭ. В связи с повышением уровня поврежденности объекта контроля возрастает акустическая энергия процесса релаксации напряжений. Такой процесс согласуется с повышением значений верхнего квартиля параметров u_m и Δt , которые достигают значений 50,9 дБ и 0,085 секунды соответственно.

Следующим этапом обработки данных является изучение особенностей АЭ данных на этапе устойчивого роста УТ. На рисунке 4.2 приведены характерные значения АЭ активности и амплитуд импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе лабораторных испытаний.



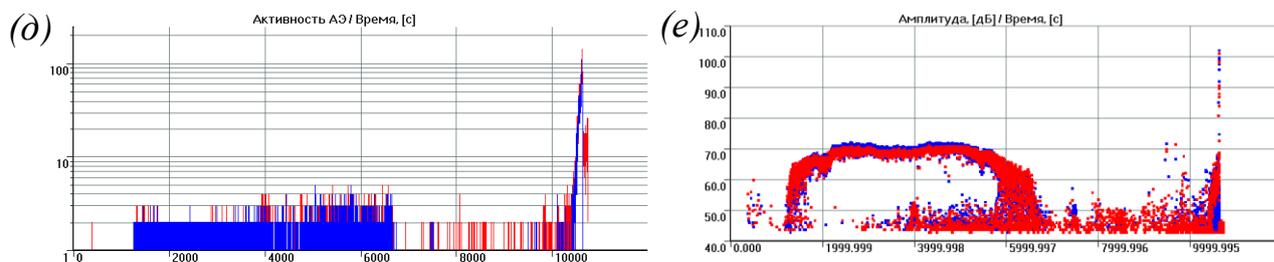


Рисунок 4.2 Исследование зависимостей АЭ активности и амплитуды импульсов АЭ от времени (*a, б*) без появления «вторичных» источников АЭ, (*в, г*) при влиянии структурных неоднородностей материала, (*д, е*) при трении берегов УТ

Как показано на рисунке 4.2*a, б*, для стадии стабильного роста УТ характерна низкая активность акустических сигналов, амплитуда которых не превышает 60 дБ. Такой характер АЭ данных остается неизменным до момента достижения критических размеров дефекта. Далее наступает этап ускоренного роста дефекта и возникновение возрастающего тренда значений стандартных параметров. Однако такой характер изменения АЭ данных может быть нарушен появлением дополнительных источников акустических сигналов. Согласно пунктам 3.3 и 3.4 третьего раздела такими источниками могут быть структурные неоднородности материала, например, неметаллические включения, а также процессы ветвления и трения берегов УТ. На рисунке 4.2*г, е* показаны изменения зависимостей амплитуды от времени при возникновении «вторичных» источников АЭ. Присутствие в структуре материала неметаллических включений приводит к повышению амплитуды до 80 дБ, при этом активность такого процесса не превышает 4 имп/цикл. При этом регистрируются тренды увеличения амплитуды импульсов и АЭ активности, сопряженные с процессами рассеянного накопления усталостных повреждений и перераспределением внутренних напряжений. АЭ активность таких процессов может достигать 10 импульсов за цикл нагружения. Для «вторичных» источников акустических сигналов, связанных с процессом трения берегов УТ, характерно возникновение импульсов АЭ, достигающих 70 дБ. При этом значения N_c достигают 7

импульсов за цикл нагружения. Необходимо отметить, что этот процесс может протекать достаточно длительное время. Характерной особенностью эффекта Элбера – эффекта трения берегов УТ – является узкий диапазон изменения амплитуд импульсов АЭ, не превышающий 7 дБ. Такого рода сигналы появляются только на этапе стабильного роста УТ. Необходимо отметить, что на стадии ускоренного роста трещины тренд изменения АЭ параметров остается неизменным. В таблице 4.2 приведены допустимые виды разладки АЭ данных в рамках устойчивого развития УТ, которые могут привести к ошибочному диагностированию стадии предразрушения.

Таблица 4.2 – Изменение параметров потока акустических сигналов при возникновении «вторичных» источников АЭ на этапе стабильного развития УТ

«Вторичный» источник АЭ	Амплитудный параметр	Параметр АЭ активности
Отсутствует	Значения амплитуды не превышают 55-60 дБ	Не превышает 3 имп/цикл
Неметаллические включения	Кратковременное повышение амплитуды до 80 дБ	В среднем 5 имп/цикл, перераспределение внутренних напряжений приводит к повышению АЭ активности до 10 имп/цикл
Трение берегов УТ	Длительный процесс, амплитуда которого может достигать 70 дБ	Незначительное повышение активности до 5 имп/цикл

4.2 Разработка алгоритма разделения стадий развития усталостных трещины

Одной из задач диссертационной работы является определение стадии развития УТ. Согласно результатам исследования распределений амплитуды и временных интервалов между соседними импульсами АЭ на этапе стабильного роста УТ в основном регистрируются низкоамплитудные акустические сигналы малой активности. На этапе ускоренного развития дефекта уровень амплитуды импульсов АЭ может достигать 100 дБ, а значение активности возрастает более чем на порядок.

В качестве численного параметра, описывающего различия распределений, предлагается использовать значение третьего квартиля ($\Delta t_{0,75}$). Так как параметр Δt зависит от периода следования циклов нагружения (T), то в качестве соотношения инвариантного к длительности цикла возможно использование выражения $\log_{10}(T/\Delta t_{0,75})$. Применение такого подхода позволит с большей вероятностью выделить активный поток АЭ сигналов, возникающий при ускоренном росте усталостной трещины. В качестве дополнительного параметра, характеризующего основные этапы развития дефекта, можно использовать кумулятивную амплитуду ($\log_{10}(\sum u_m)$) акустических сигналов. Выбор приведенных выше параметров обусловлен наибольшим различием средних значений для стадий 1 и 2. Их расчет проводится в скользящем временном окне, размер которого равен 100 отсчетам, что согласуется с параметрами наблюдаемого процесса. Их значения в зависимости от параметра нагрузки показаны на рис. 4.3.

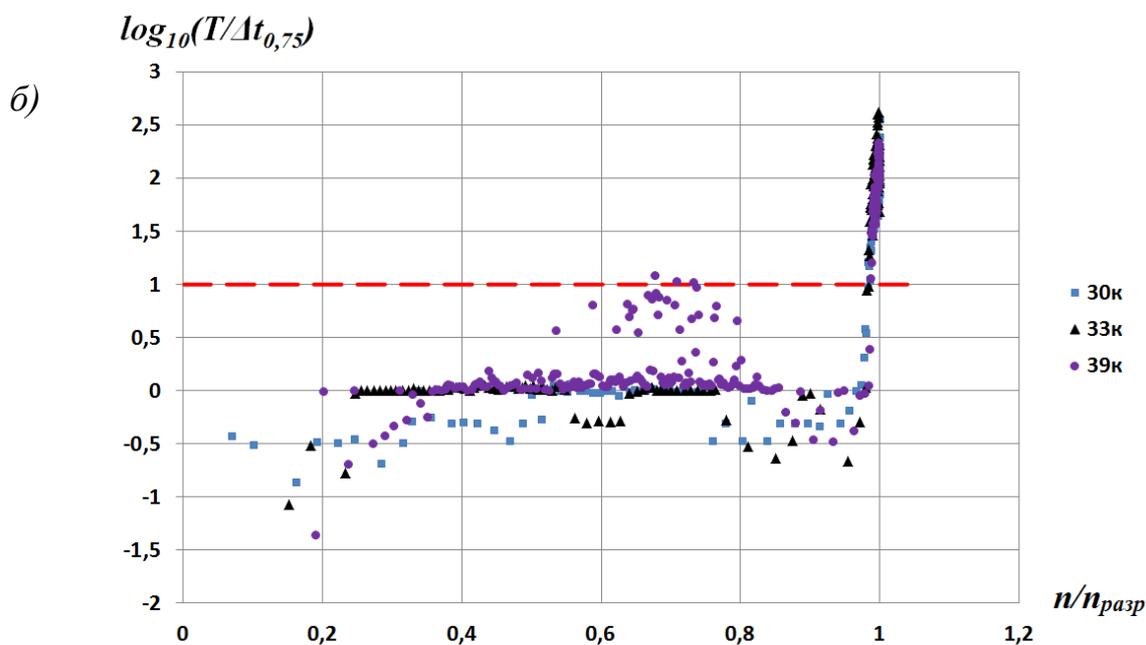
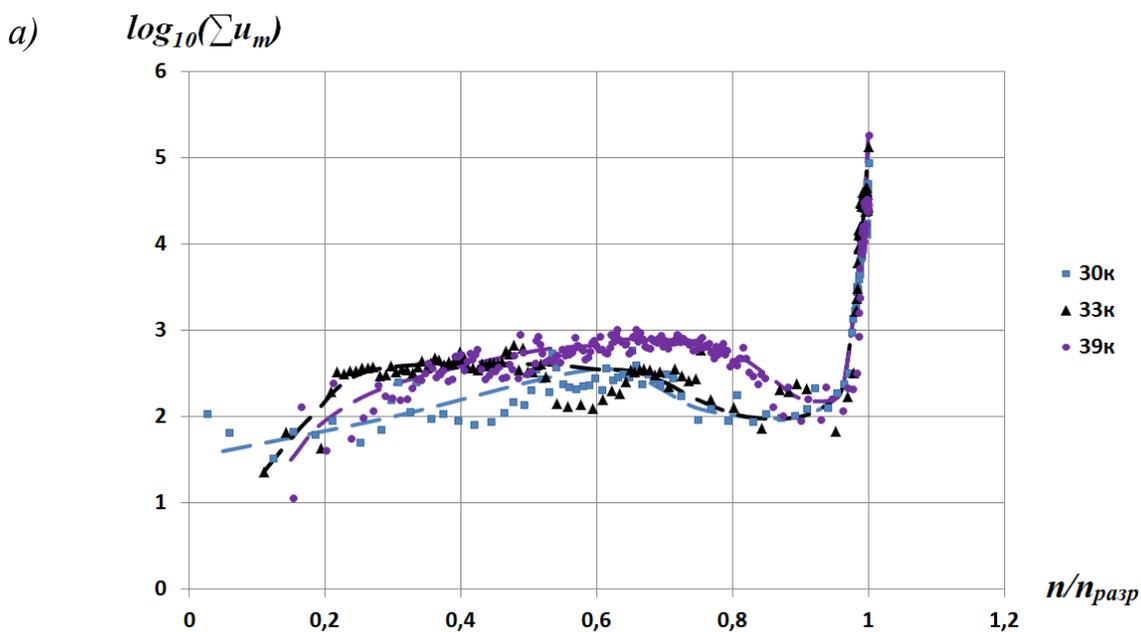


Рисунок 4.3 – Значения параметров амплитуды (а), временного интервала (б) от параметра нагрузки $n/n_{разр}$

Как показано на рис. 4.3а значения $\log_{10}(\sum u_m)$ различаются на стадиях стабильного и ускоренного развития усталостной трещины. На начальном этапе (от 0 до 0,55 $n/n_{разр}$) нагружения образца отмечается постепенное увеличение амплитудного параметра, связанное со стабильным ростом дефекта. Далее (от 0,55 до 0,95 $n/n_{разр}$) регистрируется уменьшение параметра $\log_{10}(\sum u_m)$. Такой характер изменения кумулятивной амплитуды связан с

локализацией зоны разрушения и концентрацией объема разрушения в вершине УТ, что приводит к эффекту акустического «затишья» [95, 96, 97].

По результатам, приведенным на рис. 4.3 для стабильного роста усталостной трещины параметр $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$ не превышает единицы. При переходе к ускоренному развитию дефекта отмечается повышение значений $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$. Полученную зависимость можно использовать при разделении стадий развития усталостной трещины. Необходимо отметить, что совместное использование двух параметров $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$ и $\log_{10}(\sum u_m)$ является достаточным для определения стадии развития УТ. На рис. 4.4 приведена критериальная плоскость, построенная по выбранным параметрам для различных моментов времени.

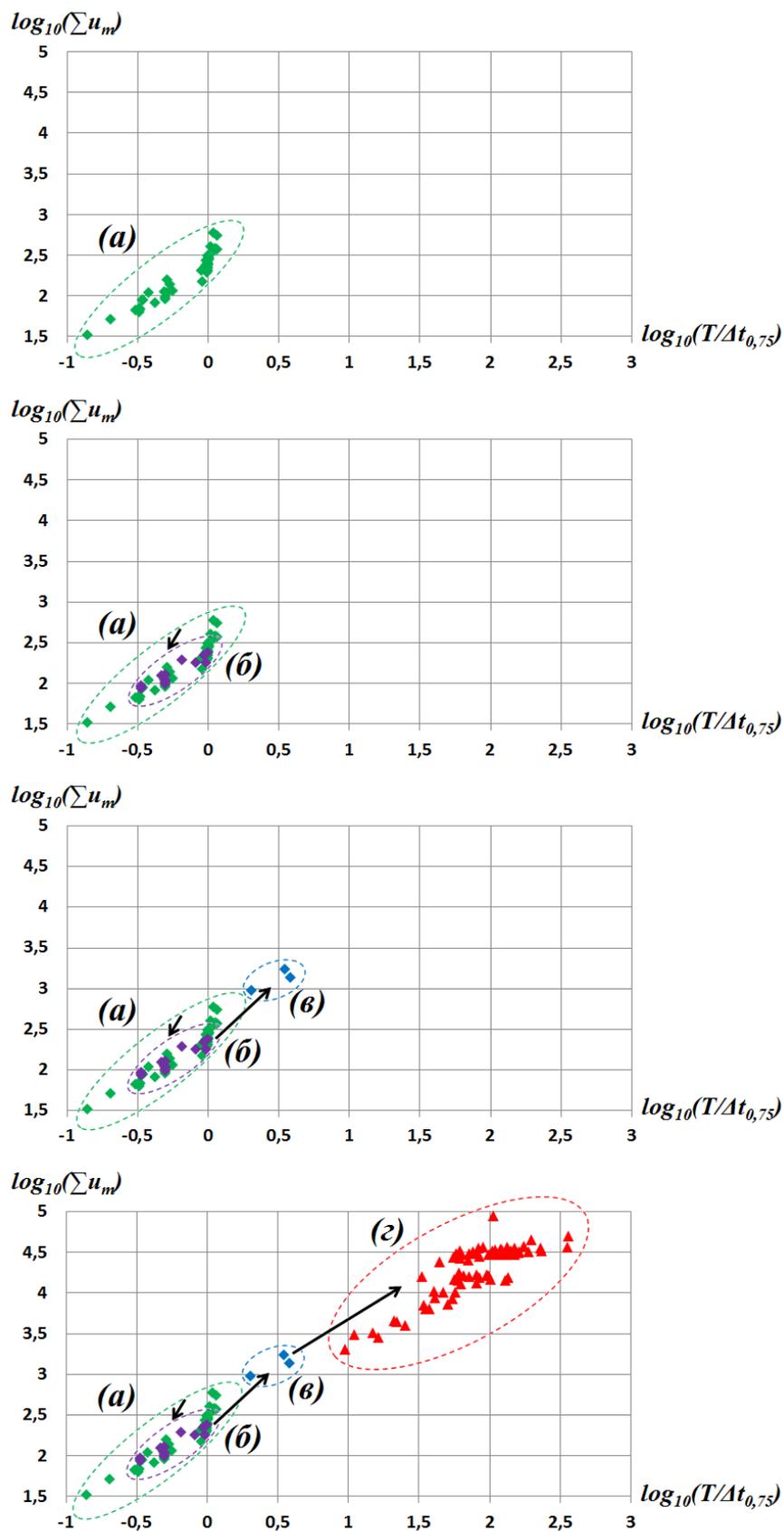


Рис. 4.4 Перемещения кластеров на критериальной плоскости, для различных циклов нагружении образца

Как показано на рис. 4.4, при усталостном разрушении образца последовательно возникают четыре характерных кластера. Кластер (а) сформирован из акустических сигналов, зарегистрированных на этапе нагружения (от 0 до 0,55 $n/n_{разр}$). Далее был зарегистрирован интервал акустического «затишья», что привело к снижению значений критериальных параметров и появлению кластера (б). При нагружении от 0,90 до 0,95 $n/n_{разр}$ отмечается плавное повышение значений критериальных параметров и образование «переходного» кластера (в). Необходимо отметить, что кластеры (а), (б) и (в) сформированы на этапе стабильного роста усталостной трещины. На интервале от 0,95 до 1 $n/n_{разр}$ возникает резкий скачок значений и образование кластера (г), соответствующее ускоренному росту дефекта. На рис. 4.5 приведен результат построения критериальной плоскости по АЭ данным, зарегистрированным при испытании серии образцов.

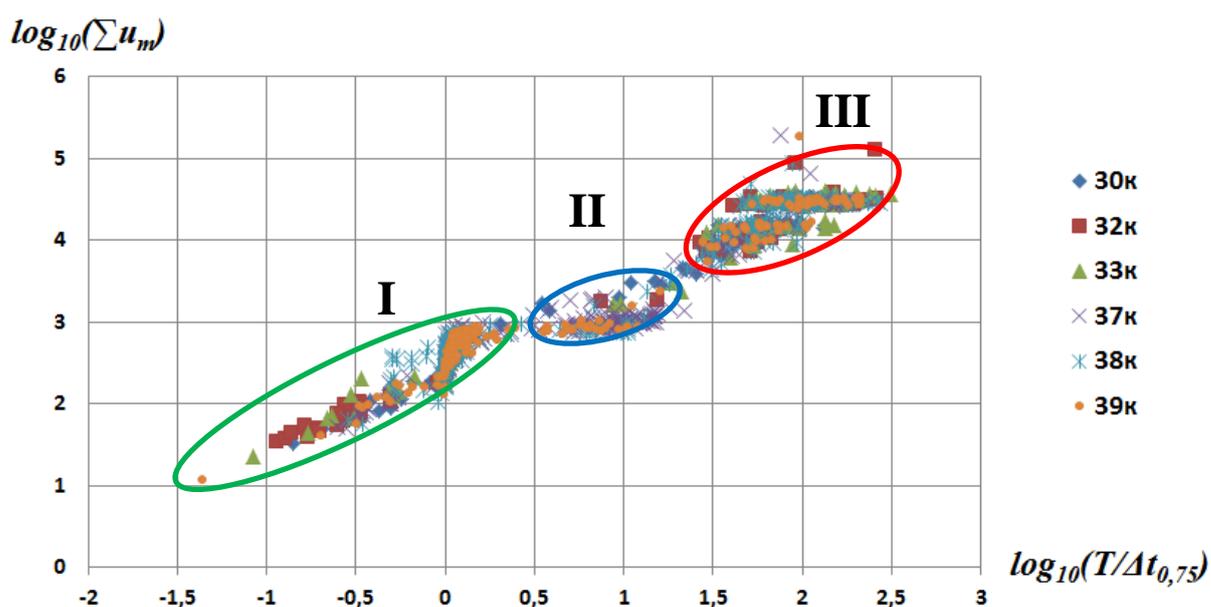


Рисунок 4.5 – Критериальная плоскость, полученная при циклическом нагружении серии металлических образцов

На рисунке 4.5 приведен результат построения критериальной плоскости $\log_{10}(\sum u_m) - \log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$. Кластер **I** соответствует этапу стабильного роста усталостной трещины. При дальнейшем нагружении зарегистрирован кластер **II**, возникающий при переходе между основными этапами развития дефекта. Кластер **III**, образованный при ускоренном развитии дефекта,

зарегистрирован на интервале от 0,95 до 1 $n/n_{разр}$. Несмотря на различия в кинетике развития повреждений, границы выделенных кластеров от образца к образцу остаются неизменными. Таким образом, применение такого подхода позволило разделить основные стадии развития усталостной трещины.

4.3 Оценка вероятности выявления усталостных трещин в зависимости от акустических свойств объекта контроля

В процессе АЭ мониторинга опасных промышленных объектов возникает множество мешающих факторов, искажающих результаты диагностики.

Актуальной задачей является оценка вероятности обнаружения усталостных трещин. Вероятность обнаружения зависит от множества факторов, в частности, от стадии развития дефекта, от расстояния между преобразователем и дефектом, определяющим длину акустического тракта и от уровня шумов, характерных для контролируемого объекта.

Для выявления дефекта методом АЭ, необходимо, чтобы чувствительность аппаратуры АЭ контроля была достаточной для того, чтобы зарегистрировать импульсы, излученные дефектом, после диссипации энергии, вызванной прохождением АЭ сигналов по акустическому тракту.

$$s(t) = u_{source}(t) * h_{channel}(t) * h_{sensor}(t) \quad (4.1)$$

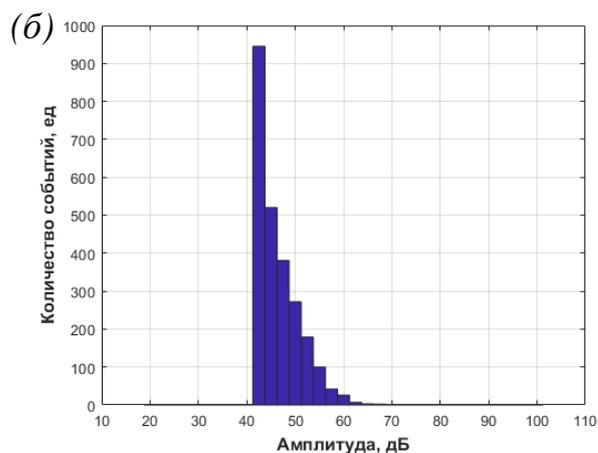
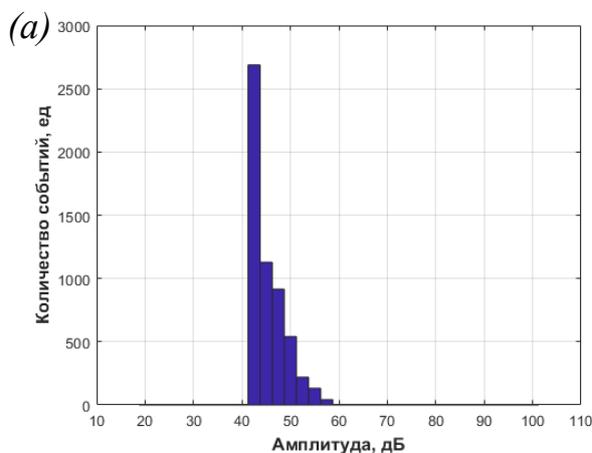
$$p = P(F(s(t) + noise(t)) > \lambda) \quad (4.2)$$

Сигнал АЭ, который регистрируется преобразователем, можно представить как результат свертки функции источника акустической эмиссии с импульсной характеристикой акустического тракта и импульсной характеристикой преобразователя АЭ. С определенными допущениями для оценки вероятности выявления дефекта по одному каналу можно принять выражение (2), где F – функция обнаружения сигнала АЭ на фоне шума $noise(t)$. При пороговом детектировании импульсов АЭ параметр λ соответствует порогу амплитудной дискриминации

Наиболее сложной для моделирования и оценивания является функция дефекта – источника АЭ, которая была определена в рамках данной работы, в некотором приближении, эмпирически. Передаточная функция акустического тракта была оценена при помощи функции затухания волн АЭ от расстояния в полосе частот от 100 до 500 кГц.

Как было показано в разделе 2 форма кривой затухания амплитуд импульсов обладает двумя основными участками – «условно ближней» и «условно дальней» областью распространения импульса АЭ. Каждый из выделенных участков характеризуется собственным коэффициентом затухания акустического сигнала, что приводит к нелинейному характеру уменьшения максимальной амплитуды.

Одним из возможных способов фильтрации помех является применение порога дискриминации. Значение порога напрямую зависит от амплитуды шумовых сигналов, возникающих при эксплуатации промышленных объектов. Таким образом, к основным параметрам, снижающим вероятность выявления усталостных повреждений, можно отнести значение порога и показателя затухания акустических сигналов. На рисунке 4.6 приведены формы амплитудных распределений, зарегистрированных на основных стадиях развития УТ при установке приемного преобразователя на различном расстоянии от источника АЭ.



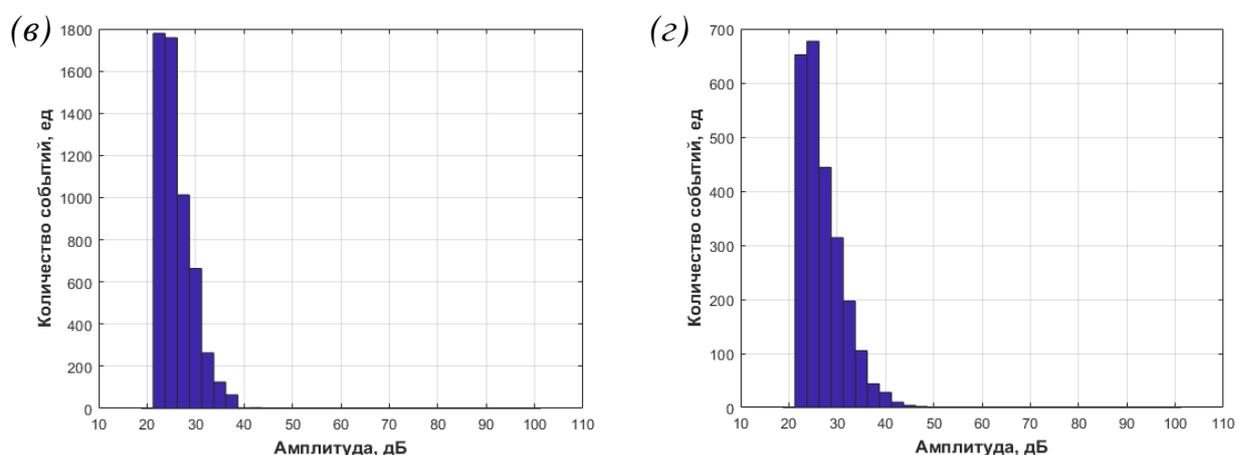


Рисунок 4.6 – Сопоставление амплитудных распределений, зарегистрированных при стабильном и ускоренном развитии УТ; (а, б) приемный преобразователь расположен вблизи источника АЭ (в, г) приемный преобразователь удален от источника на 3 метра

Как показано на рисунке 4.6, амплитудные распределения импульсов АЭ существенно зависят от протяженности акустического тракта. При удалении преобразователя АЭ от источника максимальная амплитуда импульсов АЭ снижается достаточно существенно.

Например, при выборе порога дискриминации, равным 45 дБ, количество зарегистрированных событий на участке стабильного роста УТ (рис. 4.9а) будет составлять 2504. При установке ПАЭ на 3 метра от источника количество сигналов, превышающих порог, снизится до 5 событий. Для оценки возможности проведения АЭ диагностики промышленных объектов, подверженных квазистатическим и динамическим нагрузкам, в таблицах 4.2 и 4.3 приведены значения вероятностей обнаружения УТ с учетом критических значений суммарной АЭ ($N_{\Sigma крит}$).

Расчет вероятности выявления дефекта осуществлялся с помощью следующего алгоритма. Для каждого эксперимента по циклическому нагружению металлического образца до разрушения на этапах стабильного и ускоренного роста УТ проводилось построение амплитудных распределений. Амплитуды импульсов АЭ пересчитывались с учетом характеристики затухания акустического сигнала, приведенной во втором разделе (рис. 2.12),

к расстоянию 0-5 метров от источника. Влияние шумов учитывалось при помощи задания порогового значения. Было сделано допущение о том, что уровень шумов не превышает порогового значения, а все импульсы, оказывалась ниже порога, исключались из рассмотрения. Вероятность обнаружения дефекта определялась как количество дефектов, для которого выполняется критерий обнаружения к общему количеству дефектов. В рамках работы сделано допущение о том, что дефект обнаружен, если регистрируется более N импульсов ($N=3, 5, 10$).

Таблица 4.3 Вероятности обнаружения дефекта в зависимости от порога дискриминации и акустических свойств объекта контроля на этапе стабильного роста УТ

Расстояние между источником и ПАЭ, м	Значение порога дискриминации импульсов АЭ, дБ				
	40	45	50	55	60
$N_{\Sigma крит} = 3$					
0	1	1	1	1	1
1	1	0,944	0,778	0,556	0,389
2	1	0,889	0,722	0,556	0,278
3	1	0,889	0,611	0,556	0,222
4	0,944	0,778	0,556	0,389	0,167
5	0,889	0,722	0,556	0,278	0,167
$N_{\Sigma крит} = 5$					
0	1	1	1	1	0,944
1	1	0,889	0,778	0,500	0,333
2	0,944	0,889	0,667	0,500	0,222
3	0,889	0,778	0,556	0,444	0,167
4	0,889	0,778	0,556	0,333	0,167
5	0,889	0,722	0,500	0,222	0,167
$N_{\Sigma крит} = 10$					
0	1	1	1	1	0,889

Продолжение таблицы 4.3

1	0,944	0,778	0,611	0,444	0,22
2	0,889	0,722	0,500	0,389	0,167
3	0,833	0,667	0,500	0,389	0,111
4	0,778	0,611	0,444	0,222	0,056
5	0,722	0,556	0,389	0,167	0,056

По результатам, приведенным в таблице 4.2, максимальная вероятность обнаружения дефекта на этапе стабильного роста УТ была зафиксирована при наименьшем значении порога дискриминации импульсов АЭ. Следует отметить, что увеличение расстояния между источником акустических сигналов и приемным преобразователем приводит к снижению значения вероятности. При амплитуде шумовых сигналов, равной 60 дБ, вероятность обнаружения усталостных повреждений на расстоянии свыше 3 метров стремится к нулю. В таблице 4.3 приведены значения вероятности определения дефекта на этапе ускоренного роста УТ.

Таблица 4.4 Вероятности обнаружения дефекта в зависимости от порога дискриминации и акустических свойств объекта контроля на этапе ускоренного роста УТ

Расстояние между источником и ПАЭ, м	Значение порога дискриминации импульсов АЭ, дБ				
	40	45	50	55	60
$N_{\Sigma кр\text{ит}} = 3$					
0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0,889
2	1	1	1	1	0,778
3	1	1	1	1	0,722
4	1	1	1	0,944	0,722
5	1	1	1	0,778	0,722
$N_{\Sigma кр\text{ит}} = 5$					
0	1	1	1	1	1

Продолжение таблицы 4.4

1	1	1	1	1	0,667
2	1	1	1	0,889	0,556
3	1	1	1	0,889	0,556
4	1	1	1	0,667	0,556
5	1	1	0,889	0,556	0,556
$N_{\Sigma_{крит}} = 10$					
0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0,889	0,444
2	1	1	1	0,667	0,333
3	1	1	1	0,500	0,333
4	1	1	0,889	0,444	0,278
5	1	1	0,778	0,333	0,222

При сопоставлении результатов, приведенных в таблицах 4.2 и 4.3, отмечается повышение вероятности определения дефекта при её ускоренном развитии. При малых значениях порога дискриминации акустических сигналов вероятность обнаружения УТ стремится к единице независимо от расстояния (до 5 метров) между источником и ПАЭ. При повышении уровня шума наблюдается снижение выявляемости источника АЭ. Таким образом, для повышения вероятности обнаружения усталостных повреждений в режиме мониторинга промышленных объектов необходимо разработать и внедрить новые методики фильтрации акустических помех, способствующих уменьшению порога.

4.4 Выводы

В настоящем разделе приведено сопоставление статистических параметров распределений амплитуды и временных интервалов, зарегистрированных на этапах стабильного и ускоренного развития УТ. Также в рамках исследования определены наиболее информативные АЭ параметры, значения которых изменяются при переходе между основными стадиями роста дефекта.

Исследовано влияние «вторичных источников» АЭ, таких как неметаллические включения, расслоения и трение берегов трещины на значения АЭ параметров. Присутствие неметаллических включений больших размеров вызывает повышение амплитуды акустических сигналов до 80 дБ на малом промежутке времени, длительность которого может достигать нескольких десятков секунд. Также изучено влияние расслоений металла на значения АЭ параметров. Возникновение расслоения размером до 500 мкм приводит к росту параметра N_c и максимальной амплитуды акустических сигналов. Их значения достигают 12 имп/цикл и 75 дБ соответственно.

Трение берегов трещины приводит к появлению дополнительных импульсов АЭ с постоянной амплитудой не более 70 дБ. Интервал следования таких импульсов равен периоду нагружения.

По результатам анализа АЭ данных разработана методика определения стадии развития усталостных повреждений, основанная на разделении кластеров стабильного и ускоренного роста УТ. Формирование критериальной плоскости проводится при помощи параметров $\log_{10}(\sum u_m)$ и $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$. Необходимо отметить, что на этапе стабильного роста дефекта амплитудный параметр не превышает 3, при этом максимальное значение $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$ соответствует 1. При переходе к этапу ускоренного роста УТ значения приведенных выше параметров значительно возрастают.

В рамках настоящей работы также проведена оценка вероятности выявления УТ на различных расстояниях и при различном уровне шума. Для стадии стабильного роста дефекта при пороге дискриминации импульсов АЭ 40 дБ и установке приемных преобразователей на расстоянии 1 и 5 метром значения вероятностей выявления дефекта равны 1 и 0,722 соответственно. Для стадии ускоренного развития трещины при тех же самых условиях значения показателя выявления дефекта равны 1.

5 Построение статистической прогностической модели определения количества циклов до разрушения конструкции по данным АЭ

Благодаря своим достоинствам метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее перспективных методов неразрушающего контроля (НК), применяемых в процессе мониторинга состояния промышленных объектов. Проведение непрерывной АЭ диагностики позволяет с высокой точностью определить местоположение и уровень опасности развивающихся дефектов, которые являются источниками акустических сигналов. Если уровень шума невысок, то выявление таких источников не представляет существенных трудностей. Обычно в качестве основного механизма фильтрации помех с низким уровнем акустической энергии применяется пороговый метод фильтрации. В то же время, выявление дефекта на фоне шума является нетривиальной задачей, связанной с большой вариативностью возможных источников и спецификой АЭ контроля. Активность дефекта имеет краткосрочный, импульсный характер, в то время как шумы действуют непрерывно, следовательно, кумулятивная энергия АЭ, вызванная дефектом, может быть существенно ниже энергии акустических или электромагнитных помех [98, 99]. Таким образом, на начальном этапе проведения АЭ мониторинга технических устройств необходимо выявить возможные источники акустических сигналов, оценить их частотные и энергетические параметры, а также подобрать методы фильтрации, обеспечивающие высокий уровень шумоподавления.

5.1 Разработка алгоритма фильтрации «вторичных» источников АЭ

При эксплуатации технических устройств возникает множество источников шумовых сигналов, усложняющих проведение АЭ диагностики и определение состояния объекта контроля. Причиной их возникновения могут быть не только шумы промышленного, но и структурный шум, вызванный неоднородностью металла. Неметаллические включения, расслоения, трение берегов трещины создают «вторичные источники АЭ», которые генерируют

шумоподобные сигналы, затрудняющие интерпретацию АЭ данных [100]. Устранение такого рода шума в основном осуществляется при помощи методов частотной фильтрации и анализа временных рядов [98, 101]. При исследовании механизмов накопления усталостных повреждений авторы [102] выявили импульсы АЭ, возникающие при трении берегов трещины. Их амплитуда достигает 60-65 дБ, а центральная частота спектра изменяется в широком диапазоне от 160 до 230 кГц. При этом амплитуда импульсов АЭ, соответствующих развитию дефекта, может быть ниже 60 дБ, а центральная частота соответствует резонансной частоте ПАЭ. Подобный характер АЭ данных наблюдался при испытаниях металлических образцов до разрушения. На рисунке 5.1 приведены зависимости амплитуд импульсов АЭ от времени, полученные при нагружении двух металлических образцов.

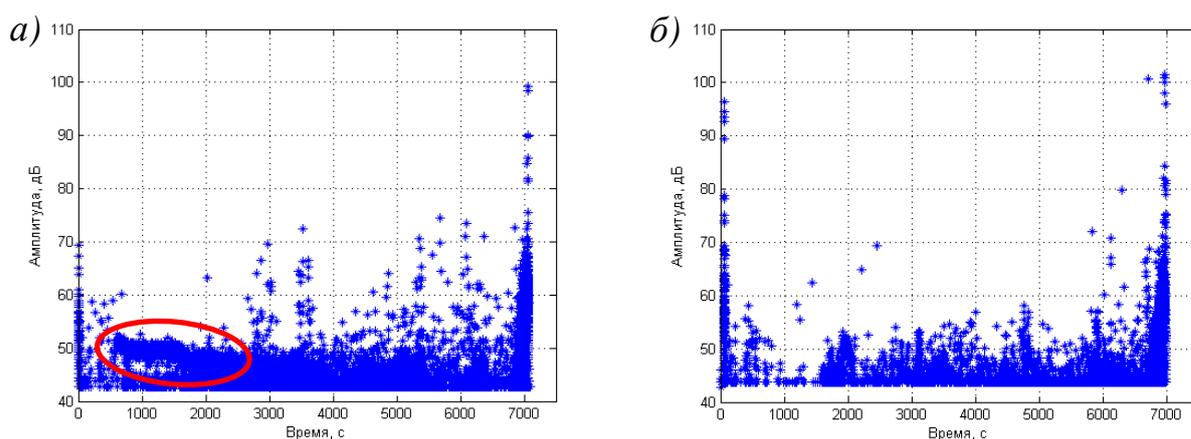


Рисунок 5.1 – Зависимость амплитуды импульсов АЭ, зарегистрированных при (а) наличии, (б) отсутствии процессов трения

Как показано на зависимости 5.1а, на начальном этапе нагружения образца регистрируются импульсы, характеризующие два процесса. К первому относятся импульсы АЭ, амплитуда которых в основном не превышает 43-45 дБ (рисунок 5.1б), при этом могут возникать локальные скачки до 65 дБ. Ко второму процессу можно отнести поток акустических сигналов, амплитуда которых изменяется в узком диапазоне, что нехарактерно для выделенного интервала времени. Например, для распределения на рисунке 5.1а диапазон амплитуд соответствует 49-51 дБ.

Дальнейшее нагружение объекта приводит к снижению средней амплитуды и завершению второго процесса, что согласуется с результатами, изложенными в Разделе 3. На рисунке 5.1б приведена зависимость амплитуды импульсов АЭ от времени при отсутствии процесса трения берегов УТ. На начальном этапе нагружения во временном интервале от 1 до 3000 секунды зарегистрированы в основном низкоамплитудные акустические сигналы с локальными выбросами до 70 дБ. В отличие от результатов, приведенных на рисунке 5.1а частота возникновения импульсов АЭ не коррелирует с периодом следования циклов нагружения. Дальнейшее нагружение образца приводит к ускоренному развитию дефекта и регистрации большего числа высокоамплитудных сигналов, что коррелирует с результатами, изложенными в Разделе 3.

На рисунке 5.2 приведены осциллограммы и спектры импульсов АЭ, соответствующие процессам развития УТ и трения ее берегов.

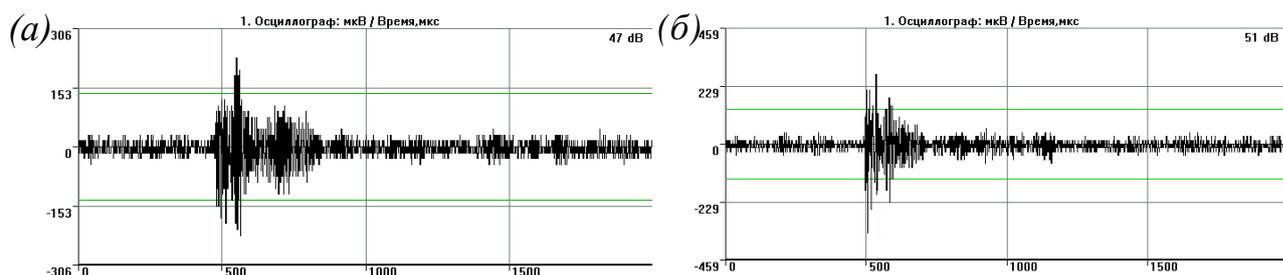


Рисунок 5.2 Сопоставление осциллограмм и спектров импульсов АЭ, соответствующих (а) развитию УТ, (б) трению берегов УТ

По результатам сопоставления импульсов АЭ, зарегистрированных при росте (рис. 5.2а) и трении УТ (рис. 5.2б), необходимо отметить, что параметры формы акустических сигналов различаются незначительно. Для каждого из приведенных выше сигналов характерно малое время нарастания и длительный спад. При этом значения максимальных амплитуд сопоставимы друг с другом. Таким образом, для повышения надежности результатов определения стадии развития магистрального трещины необходимо разработать методику фильтрации акустических сигналов, возникающих при трении берегов трещины. На начальном этапе разработки

алгоритма проведен анализ амплитудных распределений, формы которых показаны на рисунке 5.3.

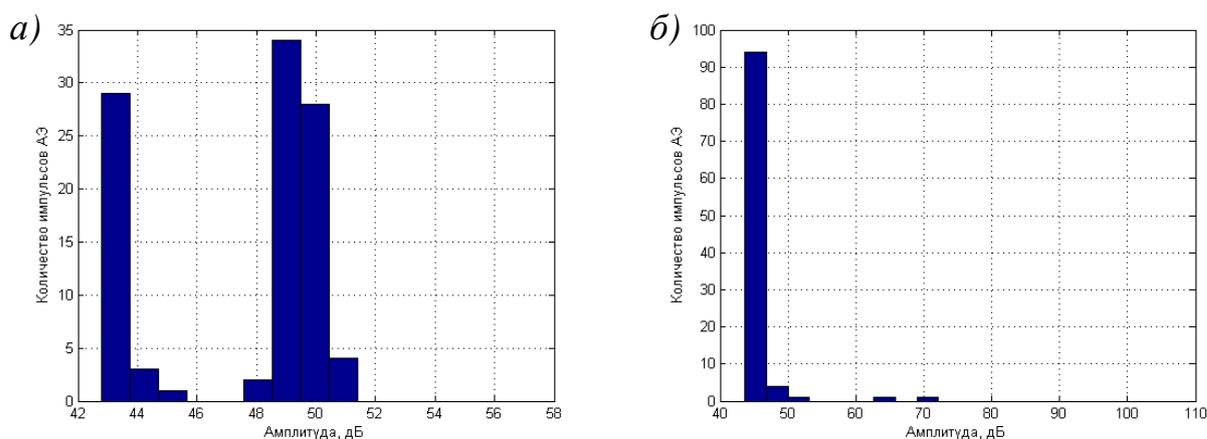


Рисунок 5.3 - Амплитудные распределения, зарегистрированные при (а, в) наличии, (б, г) отсутствии ветвления УТ

При рассмотрении формы распределений импульсов АЭ, зафиксированных во время циклического нагружения металлического образца, наблюдаются следующие различия. На рисунке 5.3а приведено распределение, зарегистрированное при возникновении «вторичного» источника АЭ, связанного с процессом трения берегов УТ. Такой процесс характеризуется появлением второй моды, нехарактерной для этапа устойчивого развития дефект (рис. 5.3б). При этом значительным отличием является большое количество импульсов АЭ амплитудой 49-51 дБ, формирующих вторую моду распределения, затрудняющих процедуру диагностики состояния объекта. Для устранения влияния таких источников АЭ требуется определить диапазон амплитуд, в рамках которого будет проводиться устранение шума.

Для решения поставленной задачи возможно применение непараметрических критериев статического анализа, позволяющих оценивать момент разладки процесса, параметры которого априорно неизвестны. Благодаря своей универсальности и простоте реализации в качестве основы методики фильтрации был выбран критерий Колмогорова-Смирнова. Процедура применения этого критерия заключается в оценке существенных

различий между эмпирическими функциями распределения случайной величины [103]. Численный расчет статистики осуществляется по приведенной ниже формуле:

$$\lambda_{\text{эмп}} = d_{\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (5.1)$$

где $\lambda_{\text{эмп}}$ – эмпирическое значение критерия, d_{max} – максимальный модуль разности частот наблюдений в интервалах гистограмм, n_1 – объем первой выборки, n_2 – объем второй выборки.

Для того, чтобы сделать вывод о схожести двух выборок, проводится сопоставление параметра $\lambda_{\text{эмп}}$ и критического значения $\lambda_{\text{кр}}(\alpha)$, где α – уровень значимости. При выполнении условия $\lambda_{\text{эмп}} \leq \lambda_{\text{кр}}(\alpha)$ принимается нулевая гипотеза H_0 (сравниваемые группы незначительно отличаются друг от друга). В обратном случае ($\lambda_{\text{эмп}} > \lambda_{\text{кр}}(\alpha)$) нулевая гипотеза отвергается, и принимается альтернативная H_1 (сравниваемые группы отличаются существенно). Применение критерия Колмогорова-Смирнова позволяет выявить моменты разладки потока АЭ данных, представленных на рисунке 5.1. С его помощью определены моменты времени, в которые регистрируется двухмодовое амплитудное распределение, второй максимум которого связан с появлением шумовых акустических сигналов. Фильтрация шума осуществляется по значениям функции разладки ($err(A_i)$), расчет которой проводится по приведенной ниже формуле:

$$err(A_i) = \begin{cases} \frac{|N_1(A_i) - N_2(A_i)|}{N_1(A_i)}, & N_1(A_i) \neq 0 \\ N_2(A_i), & N_1(A_i) = 0 \end{cases}, \quad (5.2)$$

где $N_1(A_i)$ – число импульсов АЭ с амплитудой A_i , соответствующих выборке без шумового потока; $N_2(A_i)$ – число импульсов АЭ с амплитудой A_i , соответствующих зашумленной выборке;

Необходимо отметить, что параметр $err(A_i)$ рассчитывается только в случае принятия альтернативной гипотезы H_1 . На рисунке 5.4 приведен

расчет функций разладки для представленных выше амплитудных распределений (рис. 5.3а, б).

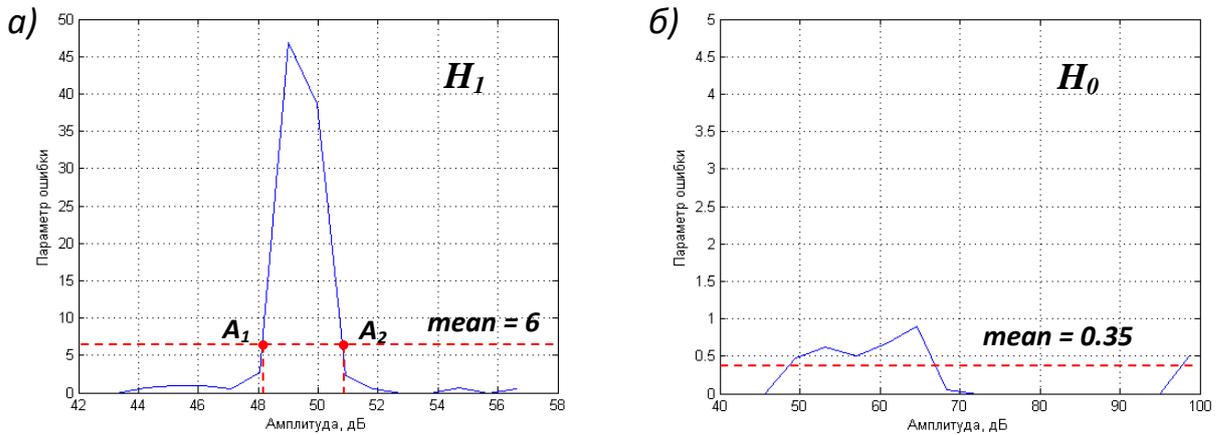


Рисунок 5.4 – Амплитудная фильтрация потока АЭ данных с (а) высоким и (б) низким уровнем шума

На рисунке 5.4 приведены результаты построения функции разладки для схожих (H_0) и различающихся (H_1) групп АЭ данных. В зависимости от принятой гипотезы можно выделить две характерные формы распределения $err(A_i)$. Для потока акустических сигналов, не содержащих шумовой составляющей, параметр разладки не превышает единицы, а среднее значение соответствует 0,35. Для значительно отличающихся друг от друга амплитудных распределений на зависимости $err(A_i)$ отмечается появление ярко выраженного максимума. Как показано на рисунке 5.3а, максимальное значение параметра $err(A_i)$ соответствует 47, при этом среднее значение этого параметра достигает 6. Для проведения процедуры фильтрации необходимо определить диапазон амплитуд ($A_1:A_2$), соответствующий шумовому процессу. Выбор границ интервала осуществляется по минимальному (A_1) и максимальному (A_2) значению амплитуды, для которых параметр $err(A_i)$ превышает среднее значение. По результатам, приведенным на зависимостях 5.2а и 5.3а, значения A_1 и A_2 равны 49 дБ и 51 дБ соответственно. На рисунке 5.5 приведен результат применения разработанной методики фильтрации импульсов, возникающих при трении берегов УТ.

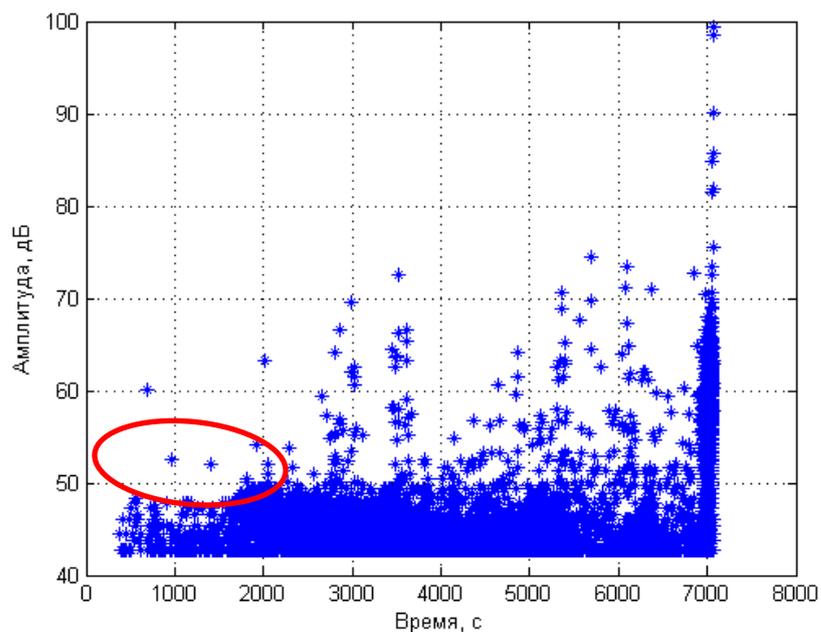


Рисунок 5.5 – Результат применения алгоритма фильтрации АЭ данных

Как показано на рисунке 5.5, в результате применения алгоритма удалось устранить шумовой поток акустических сигналов, зарегистрированный с 700 до 2000 секунды эксперимента (рис. 5.1а). Следует отметить отсутствие высокоамплитудных импульсов АЭ на начальном этапе нагружения объекта, усложняющих процедуру мониторинга состояния объекта контроля. Таким образом, на основе статистического критерия Колмогорова-Смирнова разработана методика, определяющая момент возникновения разладки потока акустических сигналов и диапазон изменения амплитуд шумовых импульсов АЭ, возникающих в процессе трения берегов УТ. В таблице 5.1 приведены результаты фильтрации «вторичных» источников АЭ, зарегистрированных при усталостных испытаниях металлических образцов.

Таблица 5.1 – Результаты фильтрации «вторичных» источников АЭ

Номер образца	Количество шумовых импульсов АЭ		Доля отфильтрованных сигналов, %
	до фильтрации	после фильтрации	
33к	1208	347	71,3

Продолжение таблицы 5.1

36к	87	33	62,1
39к	845	65	92,3
40к	5791	853	85,3
42к	172	61	64,5
43к	577	156	73,0
45к	516	171	66,9

В таблице 5.1 приведены результаты фильтрации акустических сигналов, возникающих при трении берегов УТ и влиянии неметаллических включений. Анализ полученных результатов указывает на высокую чувствительность методики фильтрации к разладке потока АЭ сигналов. С помощью разработанного подхода возможно устранение до 92,3% помех, при этом минимальный уровень соответствует 62,1% от общего количества шумовых сигналов. Актуальность применения разработанной методики обусловлена тем, что возникновение высокоамплитудных импульсов АЭ, усложняет интерпретацию АЭ данных, в частности, может привести к ошибочному определению стадии ускоренного развития УТ (рис.5.6), а применение стандартного амплитудного критерия приведет к ложной идентификации источников 3-ого и 4-ого класса опасности [21].

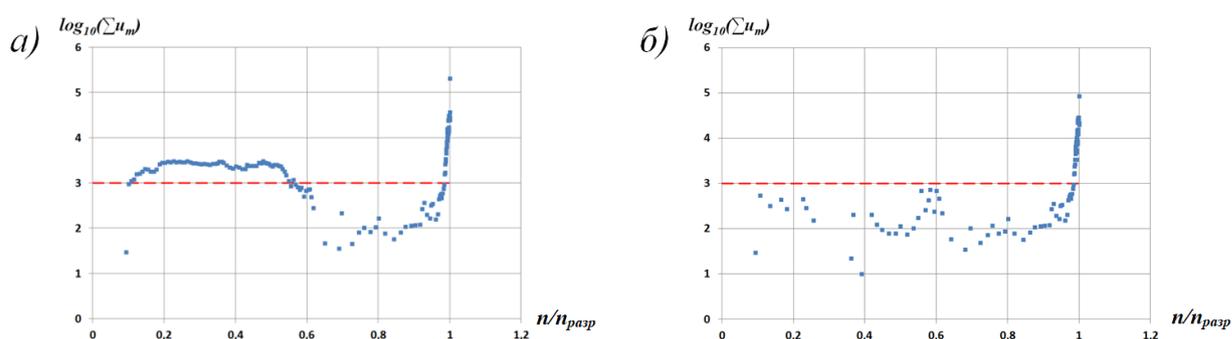


Рисунок 5.6 Применение алгоритма определения стадии развития УТ (а) до и (б) после применения алгоритма фильтрации

На рисунке 5.6 показаны значения критериального параметра, рассчитанного на основе кумулятивной амплитуды импульсов АЭ. Согласно приведенным ранее результатам критическим значением, разделяющим

стадии стабильного и ускоренного развития УТ, является $\log_{10}(\sum u_m)=3$. При этом возникновение «вторичных» источников АЭ приводит к повышению значения критерия (рис. 5.6a). На рисунке 5.6б приведены значения кумулятивной амплитуды после применения алгоритма фильтрации. Отмечается, что на стадии стабильного роста УТ амплитудный параметр не превышает порога. Таким образом, исследование АЭ данных без предварительной обработки может привести к необоснованному выводу из эксплуатации технических устройств.

5.2. Оптимальная фильтрация шумовых сигналов в АЭ контроле

При диагностике промышленного оборудования без вывода из эксплуатации возникает множество помех, энергетические параметры которых могут превышать характеристики полезных сигналов. Если при помощи порога дискриминации импульсов АЭ не удастся устранить такого рода составляющие потока акустических сигналов, то необходимо применять дополнительные методы фильтрации. Способы обработки АЭ данных выбираются исходя из параметров шума, зарегистрированного в процессе эксплуатации объекта контроля. Согласно [100, 104] шумы технологического оборудования можно разделить на три группы. В таблице 5.2 приведены их типы, причины возникновения и рекомендованные методики обработки АЭ данных.

Таблица 5.2 – Типы шумовых сигналов и методы фильтрации

Тип шумовых сигналов	Причины возникновения	Методы фильтрации	Сложность фильтрации
Выброс малой длительности; гармонический, низко- и высокочастотный шум	Электрические и электромагнитные поля	Фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ), медианная фильтрация	Низкая

Продолжение таблицы 5.2

Стационарный шум	Электронная база измерительной аппаратуры, утечки, трение и др.	Вейвлет-фильтрация	Средняя
Импульсный, нестационарный шум	Трение, гидродинамические флуктуации, кавитация	Анализ большого объема АЭ данных	Высокая

Появление помех малой длительности с характерными частотными признаками обычно связывают с воздействием на измерительную аппаратуру электромагнитных полей, а также с коммутационными процессами нарушением электрического контакта. Такие процессы могут приводить к появлению высокоамплитудных импульсов АЭ с малой длительностью, что не позволяет отстраниться от них при помощи порога дискриминации акустических сигналов. Для решения поставленной задачи обычно используются цифровые фильтры или специальные устройства, экранирующие наиболее уязвимые элементы измерительной системы.

Одним из наиболее распространенных видов помех является стационарный шум. Его возникновение может быть связано с работой измерительной аппаратуры, эксплуатационными особенностями объекта контроля, гидродинамическими или аэростатическими явлениями, возникающими при протекании жидкости или газа через несплошности. Устранение такого рода помех возможно при помощи методов цифровой обработки сигналов, например, при помощи вейвлет-фильтрации [105] или оптимального фильтра Колмогорова-Винера. Необходимо отметить, что применение оптимального фильтра на практике затрудняется отсутствием априорной информации о полезном сигнале и аддитивного шума. Обработка ограниченного объема сигналов при неопределенности характеристик помех может привести к неудовлетворительным результатам, что сделает

малоэффективным применение фильтра Винера [106]. Применение оптимального фильтра в реальных условиях ограничено недостаточным изучением спектральных характеристик импульсов АЭ, возникающих при эксплуатации промышленных объектов.

Для снижения влияния шумовых сигналов на результаты АЭ контроля используют методы временного стробирования, способы определения разладки временных рядов и другие [98, 99]. Обоснованный выбор механизмов фильтрации шумовых сигналов, возникающих при эксплуатации технических устройств, проводится с учетом причины их возникновения и степени влияния на параметры импульсов АЭ. На рисунке 5.7 приведены основные формы акустических шумовых сигналов [100], зарегистрированных при эксплуатации промышленного оборудования.

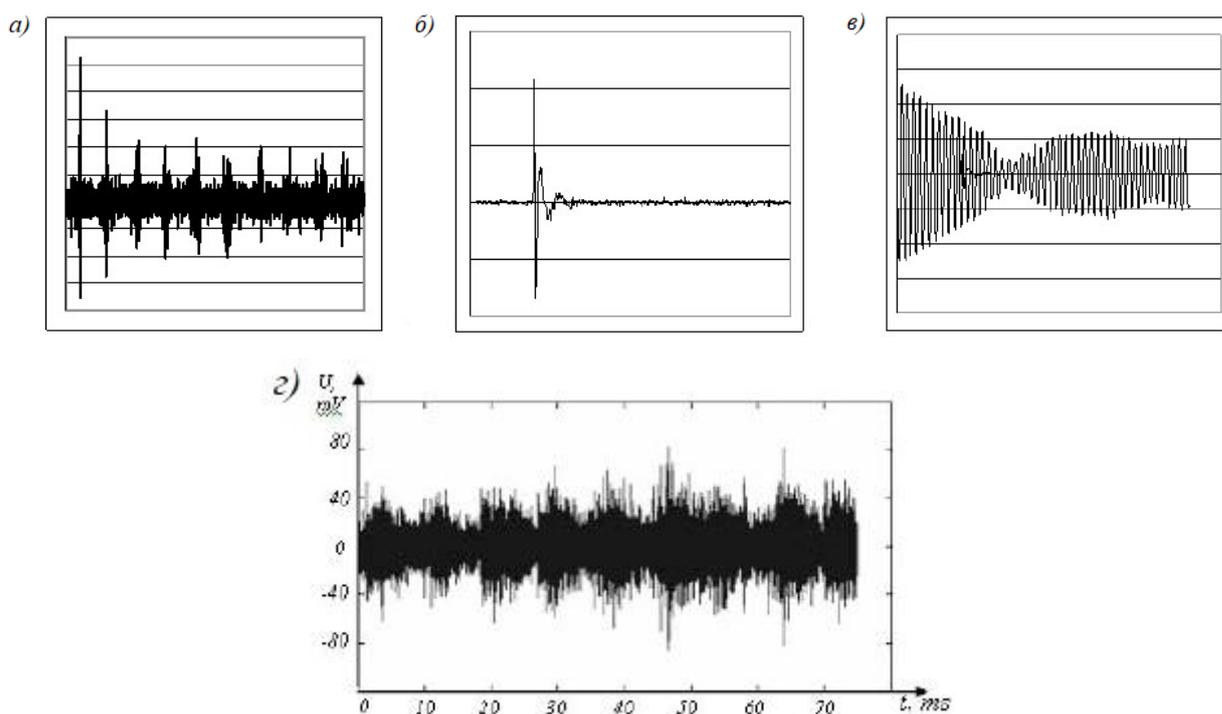


Рисунок 5.7 – Форма (а) электромагнитных помех, (б, в) электрических помех, (z) форма шумового сигнала, зарегистрированного при трении подвижных элементов объекта контроля

Как показано на рисунке 5.7, в процессе эксплуатации промышленного оборудования возникают шумовые сигналы различной формы. Их условно можно разделить на два класса – импульсные и непрерывные. Для

непрерывных помех невозможно рассчитать стандартные АЭ параметры, а также время начала и окончания сигнала. Обычно они характеризуются определенным набором гармоник, фильтрация которых осуществляется при помощи классических методов частотной фильтрации. Для импульсных помех применение цифровых фильтров возможно только в том случае, если частотные характеристики шума и полезных сигналов не совпадают. Устранение других типов помех осуществляется в режиме пост-обработки, основанном на исследовании стандартных АЭ параметров и результатах построения локационной картины. Таким образом, для фильтрации большего числа шумовых сигналов следует применять методы частотной фильтрации, одним из которых является построение оптимального фильтра Колмогорова-Винера [107].

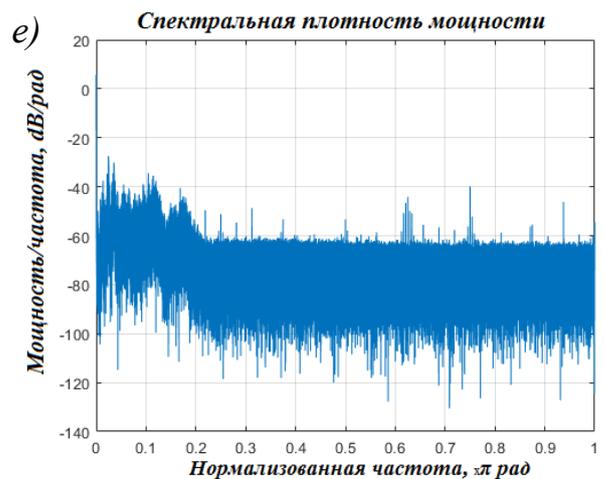
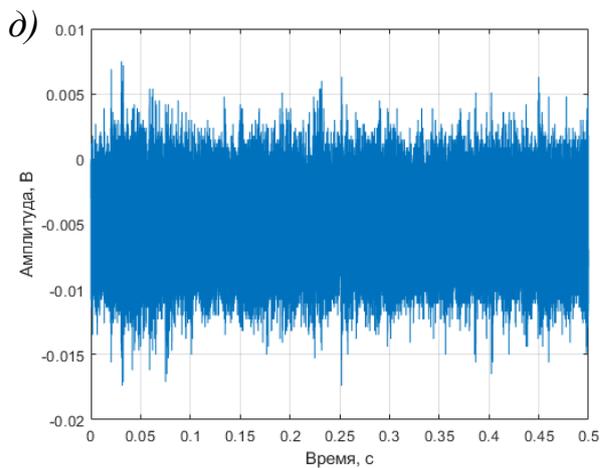
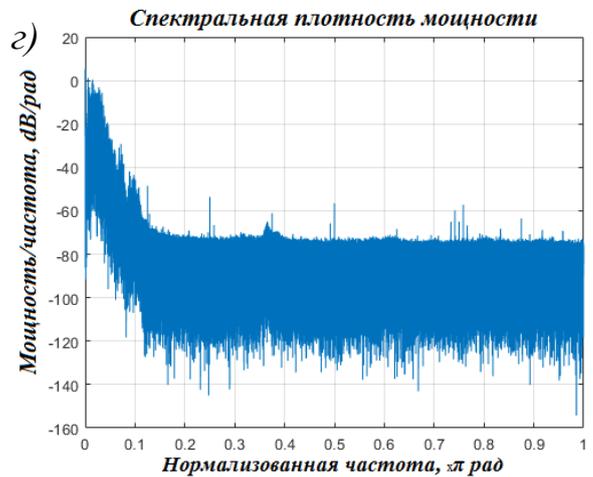
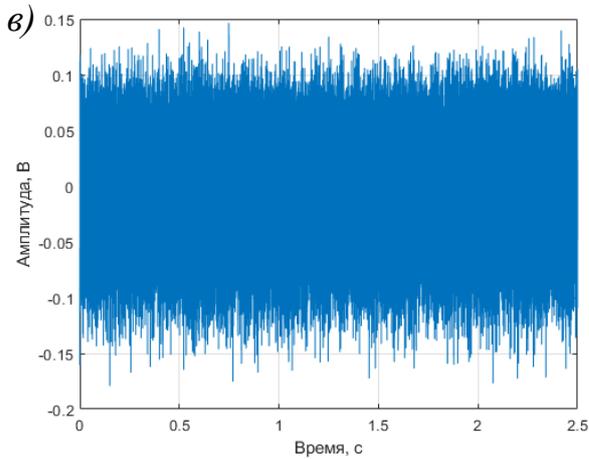
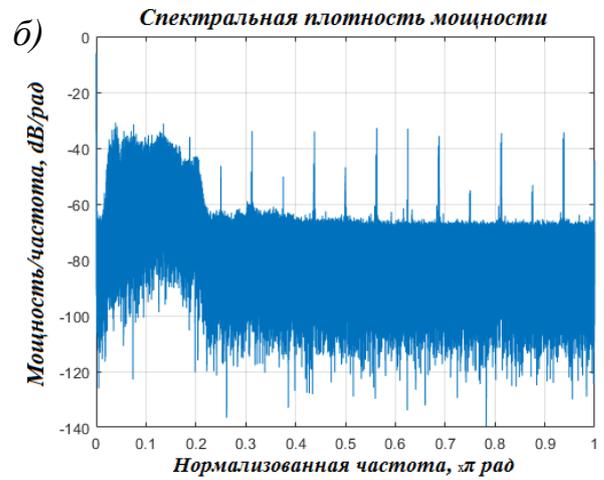
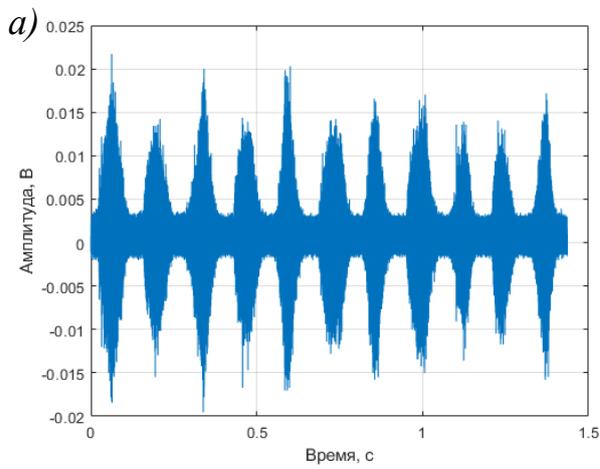
Его синтез осуществляется по априорной информации о частотных характеристиках полезного и шумового сигнала. Спектральная плотность мощности оптимального фильтра рассчитывается по приведенной ниже формуле.

$$|H_{\text{опт}}(f)|^2 = \frac{|S_i(f)|^2}{|S_i(f)|^2 + |S_n(f)|^2}, \quad (5.3)$$

где $|S_i(f)|^2$ – спектральная плотность мощности полезного сигнала, $|S_n(f)|^2$ – спектральная плотность мощности шумового процесса. В простейшем случае, когда диапазоны изменения частотных характеристики полезного и шумового сигналов не пересекаются. Задача устранения такого рода помех решается при помощи стандартного полосового или заграждающего фильтра. Необходимость применения оптимального фильтра обусловлена тем, что шумовые характеристики для каждого объекта индивидуальны. При этом параметры полезного импульса АЭ в некотором приближении совпадают с параметрами импульса, возникающего при сломе грифеля 2Н диаметром 0,3 мм (имитатор Су-Нильсена) [20, 45].

При разработке оптимального фильтра Колмогорова-Винера следует учитывать основные характеристики наиболее распространенных видов

помех. На рисунке 5.8 представлены осциллограммы и функции спектральной плотности мощности различных шумовых процессов, а также импульса АЭ, полученного при помощи имитатора Су-Нильсена.



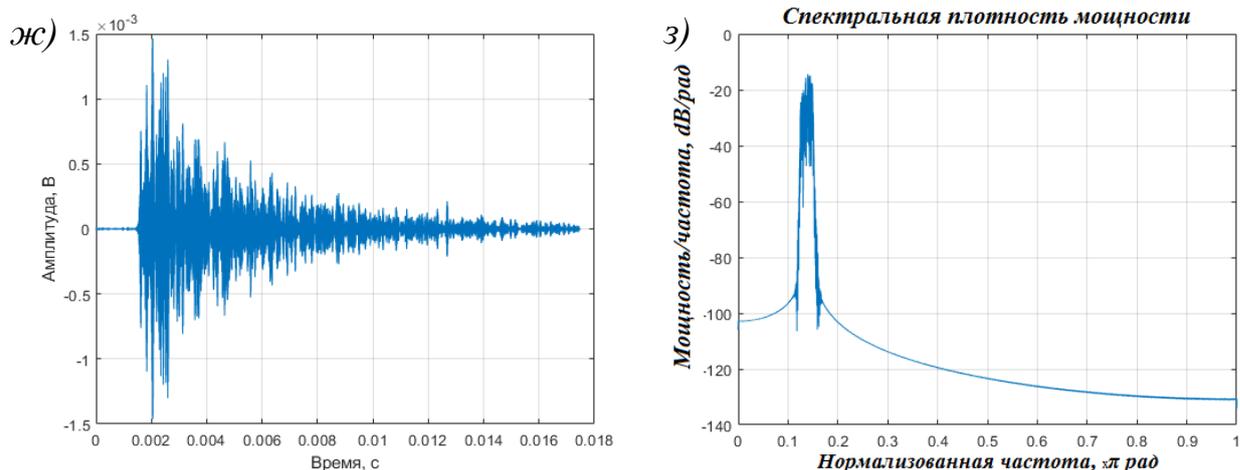


Рисунок 5.8 – Формы сигналов и функции спектральной плотности мощности шумовых процессов трения (а, б), утечки (в, г) и перемешивания (д, е), а также полезного импульса АЭ (ж, з)

Согласно результатам, приведенным на рисунке 5.8, при АЭ мониторинге состояния промышленного оборудования возникают шумовые сигналы различной природы. Помехи, зарегистрированные в процессе трения подвижных элементов технического устройства, обладают характерной формой. Отмечается плавное повышение уровня шума, а затем его снижение до первоначального уровня. Периодичность таких изменений обычно согласуется с параметрами технологического процесса, например, временем полного оборота вала роликовой опоры вращающейся печи [108]. При появлении утечек возникает стационарный акустический шум, максимальная амплитуда которого с течением времени изменяется незначительно. Спектральная характеристика таких сигналов в основном имеет низкочастотный характер (рис. 5.8г), что упрощает задачу фильтрации АЭ данных. Главным отличием акустических сигналов, зарегистрированных в процессе перемешивания, является появление импульсных шумов малой амплитуды (рис. 5.8д). Причиной их возникновения является ударное воздействие взвешенных частиц рабочей среды на внутреннюю поверхность объекта контроля. Такие особенности формирования потока акустических сигналов приводят к появлению высокочастотных составляющих спектра (рис. 5.8е), усложняющих процедуру проведения фильтрации. Таким

образом, по приведенным на рисунке 5.8 характеристикам спектральной плотности мощности как шумовых, так и полезных сигналов, возможно построение оптимального фильтра Колмогорова-Винера. На рисунке 5.9 показаны передаточные характеристики оптимальных фильтров.

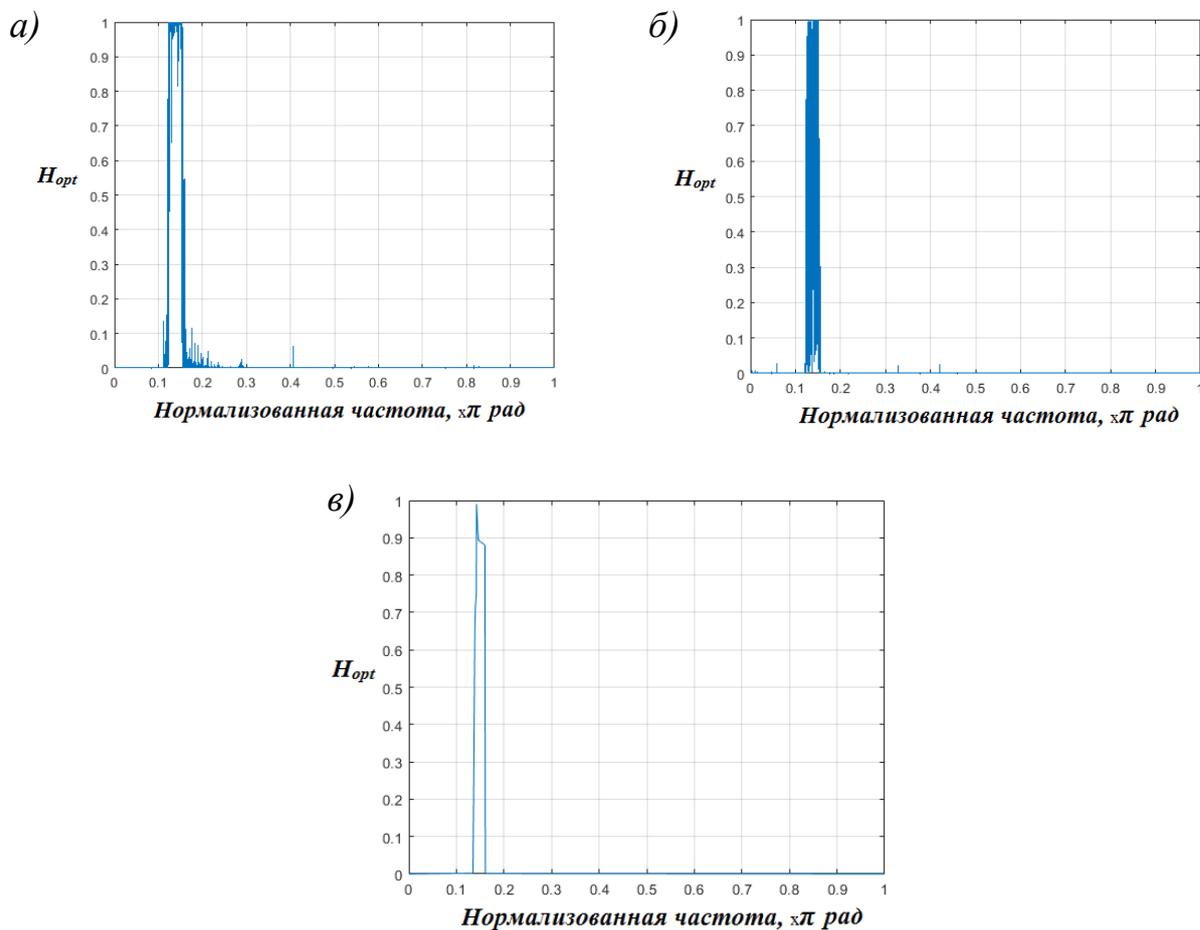


Рисунок 5.9 – Форма передаточных характеристик, синтезированных для устранения шумовых процессов (а) трения, (б) утечки, (в) перемешивания

Результаты применения оптимальных фильтров приведены на рисунке 5.10.

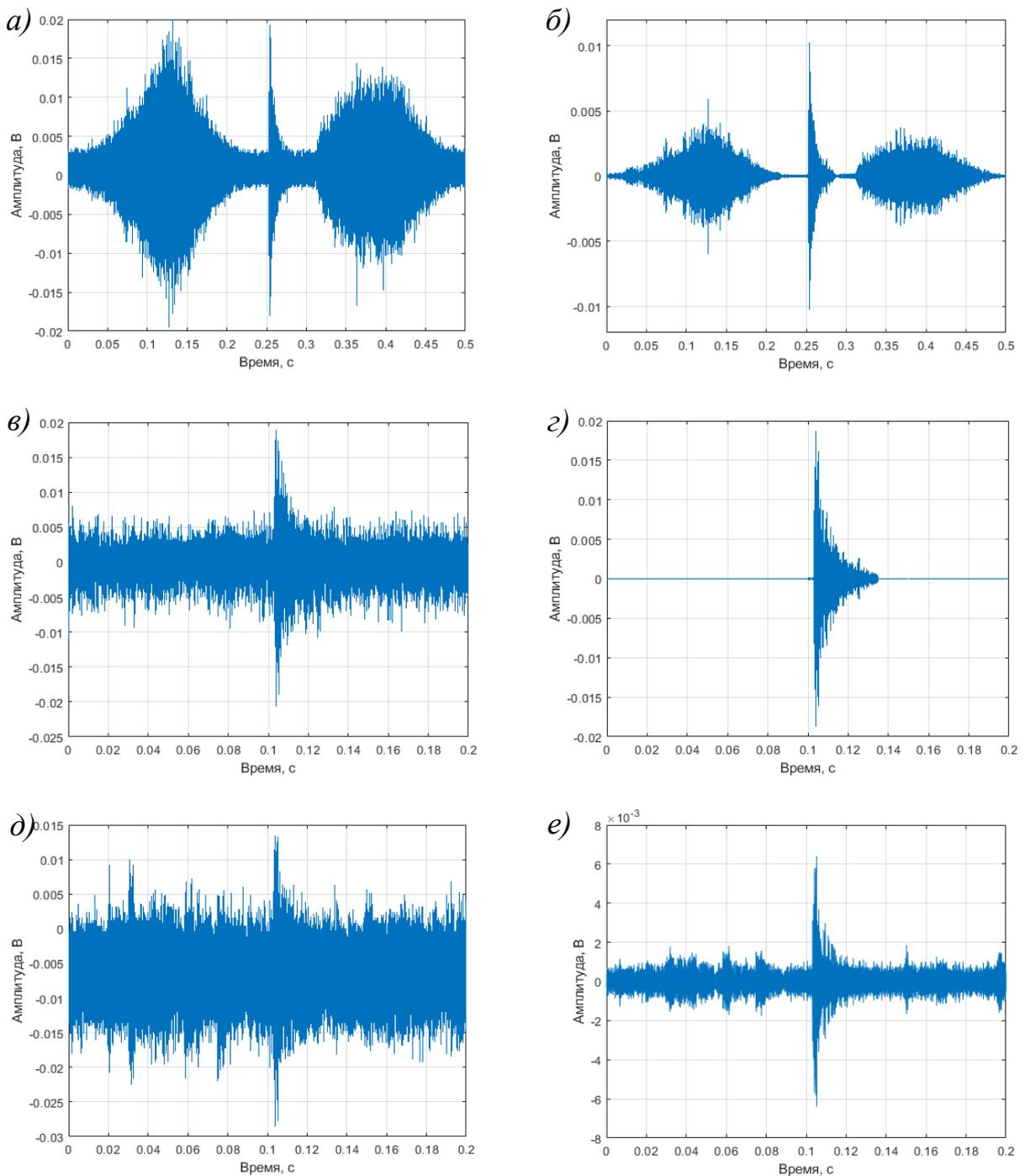


Рисунок 5.10 – Результат проведения оптимальной фильтрации процессов трения (а, б), утечки (в, г) и перемешивания (д, е)

На рисунке 5.10 приведены результаты фильтрации потоков АЭ данных, содержащих шумовые и полезные акустические сигналы. Наилучший показатель был получен при обработке помех, источниками которых являются процессы перемешивания (рис. 5.10д, е) и утечки (рис. 5.10в, г). После применения оптимального фильтра отношение сигнал/шум увеличилось от 1,65 до 3,87 и от 2,31 до 1484,96 соответственно. Необходимо

отметить, что спектральные составляющие, соответствующие процессу перешивания, совпадают с частотными характеристиками полезного импульса АЭ, что усложняет процедуру фильтрации. В связи с этим отмечается резкое снижение максимальной амплитуды полезного сигнала с 0,0186 В до $4,51 \cdot 10^{-11}$ В.

На рисунке 5.10а показан акустический сигнал, состоящий из нестационарной помехи, на фоне которой зарегистрирован полезный импульс АЭ. Уровень нестационарной шумовой составляющей акустического сигнала соответствует СКО шума за один период. До применения винеровского фильтра значение СКО шума было равным 0,0026 В, а максимальная амплитуда импульса АЭ соответствовала 0,0186 В. После проведения фильтрации уровень помех значительно снизился и параметр СКО стал равным $6,91 \cdot 10^{-4}$ В, при этом отмечается уменьшение амплитуды импульса АЭ до 0,0102. Таким образом, после применения оптимального фильтра СКО шума снизилось в 3,76 раз, а уровень полезного сигнала в 1,86 раза, что повышает вероятность и делает возможным обнаружение импульсов АЭ при помощи порогового метода. Таким образом, применение оптимального фильтра для всех типов шумовых сигналов привело к повышению отношения сигнал-шум, при этом для устранения нестационарной помехи следует использовать дополнительные методики.

Согласно результатам, приведенным в Разделе 2, затухание импульса АЭ является нелинейным процессом, характеристики которого основаны на свойствах дисперсии акустического сигнала. При этом быстрое затухание высокочастотных составляющих волны в «условно ближней» зоне может значительно снизить достоверность применения оптимального фильтра. На рисунке 5.11 показан результат фильтрации импульсов АЭ, зарегистрированных на различном расстоянии относительно приемного преобразователя.

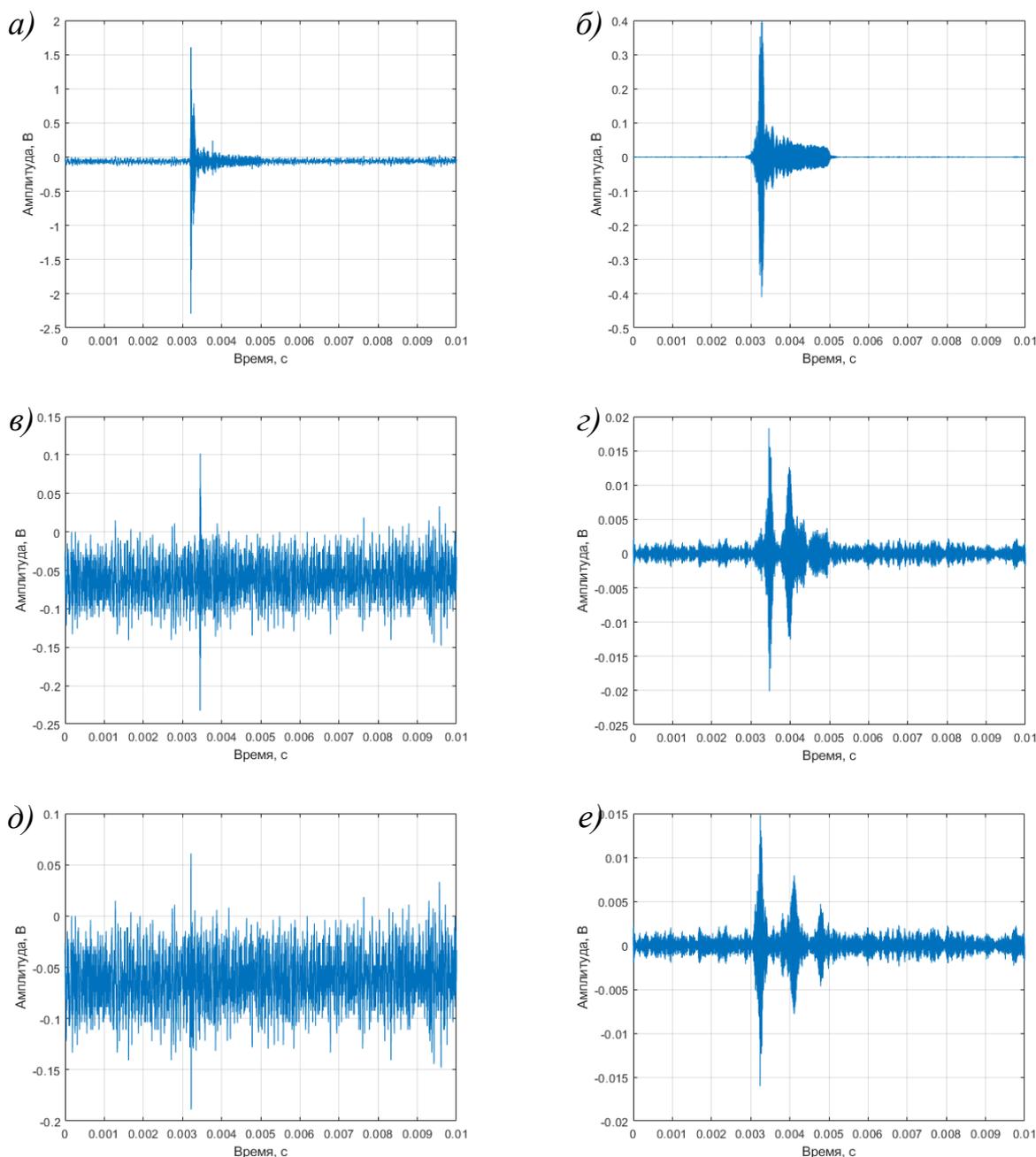


Рисунок 5.11 – Применение оптимального фильтра Колмогорова-Винера для устранения шумовых составляющих акустических сигналов, зарегистрированных на расстоянии (а, б) 0 м, (в, г) 3 м и (д, е) 5 м относительно местоположения источника импульсов АЭ

На рисунках 5.11 приведены результаты фильтрации шумового потока, затрудняющего выявления полезных импульсов АЭ, зарегистрированных на различном расстоянии от источника акустических сигналов. Для устранения шумовых составляющих был использован оптимальный фильтр Колмогорова-Винера, синтез которого осуществлялся по спектральным

характеристикам помехи и акустического сигнала, сгенерированного при помощи источника Су-Нильсена вблизи приемного преобразователя.

На рисунках 5.9в и г приведены результаты устранения шумовых составляющих акустического сигнала, зарегистрированного на расстоянии 3 метра относительно местоположения источника. В результате применения винеровского фильтра значение параметра сигнал/шум возросло с 2,25 до 15,24, что подтверждает работоспособность метода при удалении источника АЭ от преобразователя. Необходимо отметить, что использование оптимальной фильтрации позволяет увеличить зону контроля путем выявления низкоамплитудных сигналов на фоне шумового процесса. На рисунке 5.9д, е показан результат применения этого метода, с помощью которого значение параметра сигнал/шум увеличилось с 1,24 до 7,43. Таким образом, применение фильтра Колмогорова-Винера позволяет определять большее количество полезных акустических сигналов на фоне шумов технического оборудования, что повышает достоверность АЭ мониторинга и точность определения относительного количества циклов до разрушения ($n/n_{разр}$) объекта контроля.

5.3 Разработка регрессионной модели оценки количества циклов до разрушения объекта контроля

Определение параметра ($n/n_{разр}$) для промышленных объектов, находящихся в эксплуатации, является одной из наиболее актуальных задач технической диагностики. Согласно результатам, приведенным в Разделе 4, при помощи систем АЭ мониторинга возможна как оценка основных стадий роста усталостной трещины, так и оценка количества циклов до разрушения. Для решения поставленной задачи и с целью повышения достоверности результатов АЭ диагностики предлагается использовать прогностические методы статистического анализа. Одним из возможных решений является разработка регрессионной модели (5.4), связывающей $n/n_{разр}$ (зависимая переменная – y) и параметры акустической эмиссии (независимые переменные – $x_1...x_n$), зарегистрированных при развитии дефекта. Наиболее

простым способом определения коэффициентов линейной регрессии является метод наименьших квадратов [109], основанный на минимизации разности наблюдаемой величины и её оценки.

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, \quad (5.4)$$

где a – коэффициенты линейной регрессионной модели.

На начальном этапе формирования регрессионной модели необходимо выделить такие АЭ параметры, при помощи которых возможно в полной мере описать поток акустических сигналов. К ним можно отнести:

- 1) Амплитуду;
- 2) Длительность;
- 3) Сумму импульсов АЭ;
- 4) Активность;
- 5) Время нарастания;
- 6) Отношение времени нарастания к амплитуде акустического сигнала;
- 7) Отношение количества выбросов к длительности импульса АЭ.

Применение перечисленных выше переменных позволит комплексно описать не только параметры потока акустических сигналов, но и форму единичных импульсов АЭ. Поскольку, перечисленные выше параметры имеют случайный характер, для их описания использовались параметры статистических распределений, рассчитанные как в скользящем окне - локально, так и на всем интервале от начала наблюдения до текущего момента - кумулятивно.

В качестве локальных параметров были рассчитаны среднее значение – $mean_{loc}$, суммарное значение – sum_{loc} , медиана – med_{loc} , нижний квартиль – Q_{1loc} , верхний квартиль – Q_{3loc} . Те же статистики были использованы для описания кумулятивных параметров процесса среднее – $mean_{cum}$, суммарное значение – sum_{cum} , медиана – med_{cum} , нижний квартиль – Q_{1cum} , верхний квартиль – Q_{3cum} . Применение такого подхода позволяет использовать в

качестве независимых переменных регрессионной модели более 100 параметров АЭ.

Был применен алгоритм пошаговой линейной регрессии, который позволяет автоматически выбирать переменные, обеспечивающие наилучшее предсказание зависимой переменной (количества циклов до разрушения) по нескольким независимым переменным (параметрам АЭ). В результате выполнения алгоритма для включения в модель было выбрано 5 переменных – $sum_{cum}(\Delta t)$, $sum_{cum}(amp_{mkV})$, $med_{cum}(\Delta t)$, $Q_{3cum}(\Delta t)$, $Q_{3cum}(FA)$, где Δt – временной интервал между соседними импульсами АЭ, amp_{mkV} – значение амплитуды, FA – Выбросы/Длительность. Выбранные параметры обеспечили среднюю погрешность определения количества циклов до разрушения не более 4,2 %. Достоверность модели подтверждается значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,963$ и значением статистики Фишера $F=9365$, в соответствии с которой значения коэффициентов модели отличны от нуля с вероятностью близкой к единице.

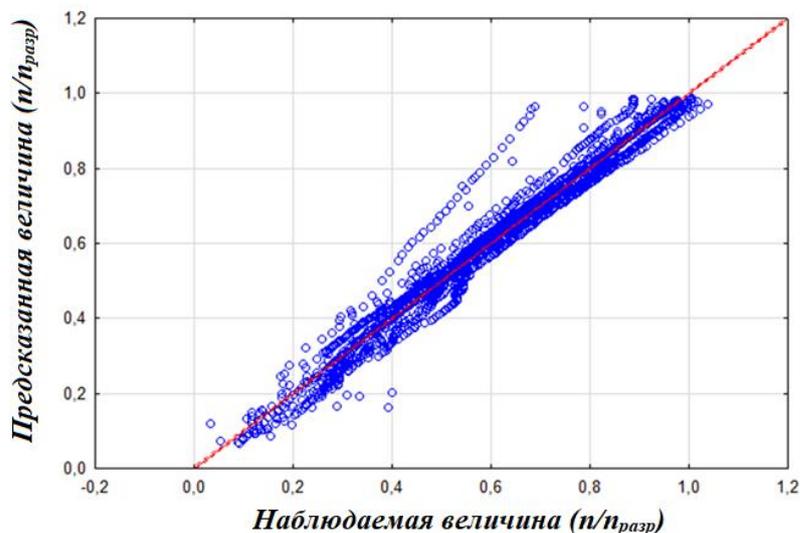


Рисунок 5.12 – Сопоставление наблюдаемой величины $n/n_{разр}$ и результатов построения регрессионной модели

Как показано на рисунке 5.12, в результате построения регрессионной модели большая часть предсказанных значений количества циклов до разрушения была согласована со значениями наблюдаемой величины. Из-за изменения АЭ параметров при возникновении расслоений и присутствия

неметаллических включений в материале процесс линейризации параметра $n/n_{разр}$ не является достаточно надежным. Также отклонения результатов математической модели можно связать с высокой сложностью описания процесса накопления повреждений на этапе стабильного роста УТ.

Таким образом, для повышения достоверности результатов оценки параметра $n/n_{разр}$ более эффективным будет использование нелинейных прогностических моделей, таких как нейронные сети. Результаты регрессионного анализа важны с точки зрения определения информативных АЭ параметров, которые следует использовать для обучения нейронной сети.

5.4 Методика оценки количества циклов до разрушения с использованием нейронных сетей

Одним из возможных решений проблемы достоверного определения параметра $n/n_{разр}$ при АЭ диагностике технических систем может стать применение нейронных сетей. Нейронная сеть – это распределенный параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки [110]. Основным достоинством таких систем является нелинейность, что позволяет определять взаимосвязи между значениями $n/n_{разр}$ и стандартными параметрами акустических сигналов. Главной вычислительной единицей нейронной сети является нейроны, которые по своим свойствам могут быть разделены на три основных типа (слоя): входные – слой получения информации; скрытые – слой, обеспечивающий обучаемость и производительность сетей; выходной – слой вывода результатов (рис. 5.13). Как правило, нейронные сети применяются в том случае, если связь между входными и выходными величинами не подчиняется известным математическим законам и моделям. Для их достоверного использования необходимо провести процесс обучения, необходимый для корректировки весов и пороговых значений таким образом, чтобы минимизировать функцию ошибки.

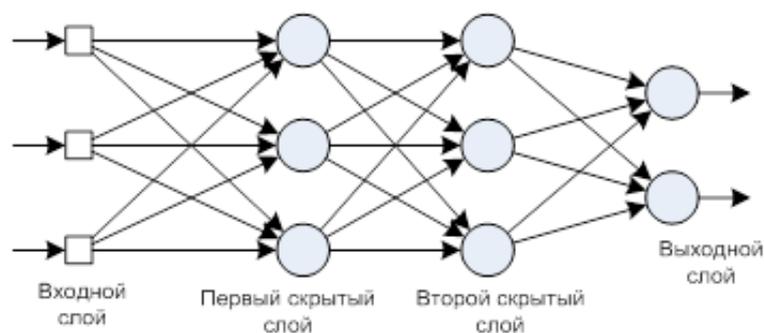


Рисунок 5.13 – Архитектура многослойного персептрона с двумя скрытыми слоями

Для решения поставленной задачи проведена разработка многослойного персептрона (МЛП), позволяющего не только определять, но и прогнозировать значения остаточной прочности металлического образца с использованием наиболее информативных АЭ параметров. На начальном этапе формирования МЛП выбирается количество скрытых нейронов и обучающих сетей. В настоящей работе количество скрытых нейронов изменялось от 3 до 11, при этом проводилось построение 20 обучающих сетей, 5 из которых использовались при дальнейшем анализе результатов. Далее проводился выбор функции активации, вычисляющей выходной сигнал искусственного нейрона. Наилучший результат получен при использовании для скрытых нейронов гиперболической функции активации, при этом для выходных нейронов применялась логистическая функция (рис. 5.14).

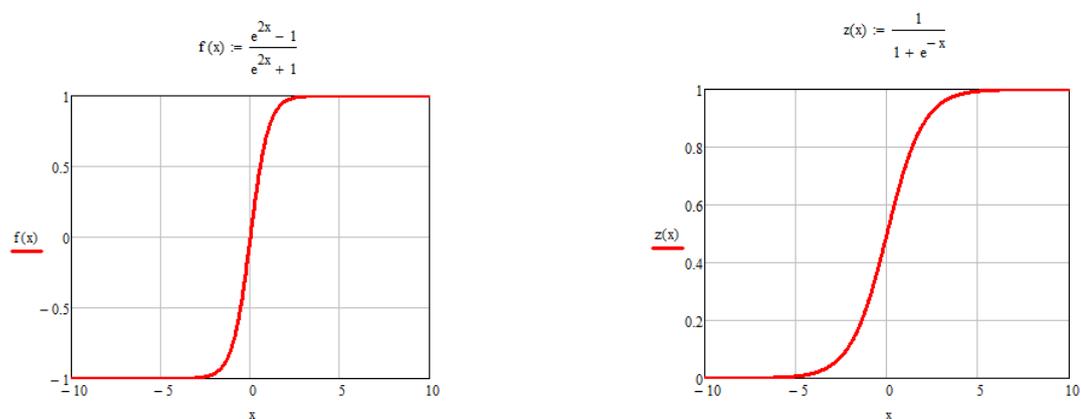


Рисунок 5.14 – Форма (а) гиперболической и (б) логистической функции активации

Следующим этапом разработки нейросетевой модели является выбор алгоритма обучения. Для решения поставленной задачи был выбран метод Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS), предназначенный для определения экстремумов нелинейного функционала. Он является одним из наиболее широко применяемых квазиньютоновских методов, оценивающих определитель матрицы Гессе приближенно, что позволяет сохранить вычислительные ресурсы блока обработки АЭ данных. Для его применения проводится итерационное разложение функционала в полином второй степени:

$$f(x_k + p) = f(x_k) + \nabla f^T(x_k)p + \frac{1}{2}p^T H(x_k)p, \quad (5.5)$$

где x_k – аргумент на k -ом итерационном шаге, $H(x)$ – гессиан функционала f в точке x . После оценки приближенного значения гессиана находят минимум полученной квадратичной задачи, после чего определяют такую точку, для которой выполняется условие Вольфе:

$$f(x_k + \alpha_k p_k) \leq f(x_k) + c_1 \alpha_k \nabla f_k^T p_k \quad (5.6)$$

На заключительном этапе задания нейронной сети проводится выбор функции ошибки. В настоящей работе в качестве функции ошибки использовалась сумма квадратов отклонений выходных сигналов относительно требуемых значений:

$$E = \sum_{i=1}^m (z_i - z_i')^2, \quad (5.7)$$

где E – функция ошибки, z_i – значение i -ого нейрона выходного слоя, z_i' – требуемое значение i -ого нейрона выходного слоя.

Для получения результата с наименьшим уровнем погрешности в пакете программы «Statistica» проведен синтез нейронных сетей с различными параметрами функции активации скрытых и выходных нейронов. В результате наилучшие показатели аппроксимации были получены для многослойного персептрона с одним скрытым слоем с 10 нейронами, при этом функция активации скрытых нейронов соответствовала

гиперболической, а для выходных – логистической. На рисунке 5.15 приведена зависимость погрешности обучения от номера эпохи (номера итерации в процессе обучения).

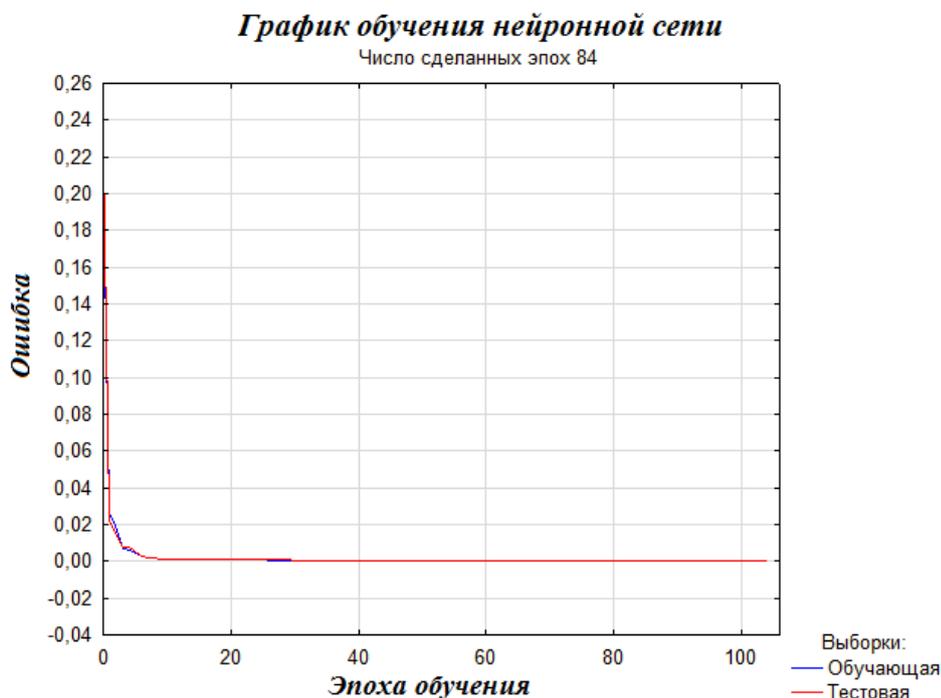


Рисунок 5.15 – Зависимость ошибки обучения нейронной сети от номера эпохи

Как показано на графике 5.15, за первые 10 эпох уровень ошибки снизился от 0,22 до 0,01 как для обучающей, так и для тестовой выборки. При дальнейшем обучении уровень ошибки изменяется незначительно и на заключительном шаге составляет 0,0038. На заключительном этапе (рис. 5.16) исследования приведены результаты построения математической модели прогнозирования параметра $n/n_{разр}$ на основе нейронной сети.

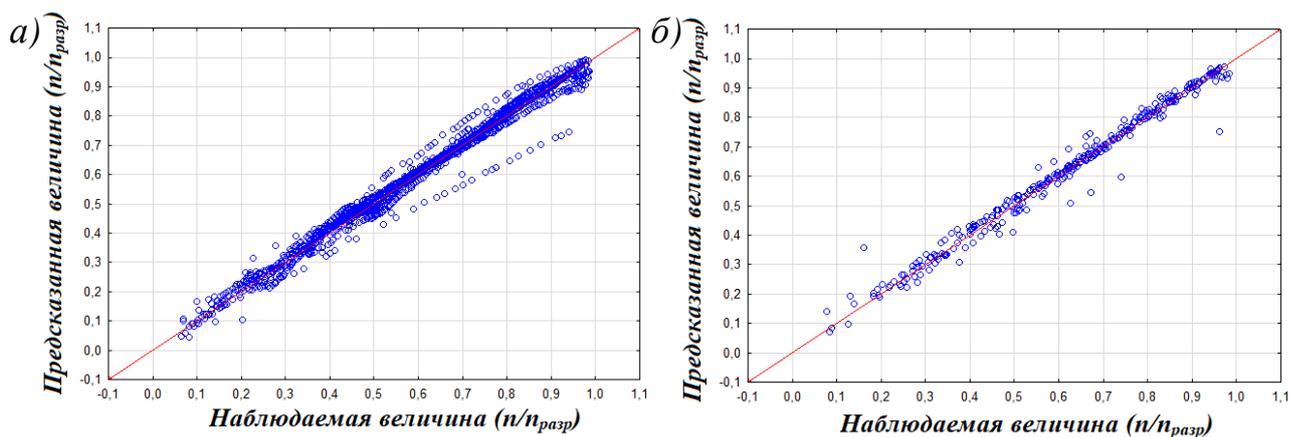


Рисунок 5.16 – Сопоставление наблюдаемой величины $n/n_{разр}$ и результатов построения нейронной сети для (а) обучающей (б) тестовой выборки

На рисунке 5.16 приведены значения количества циклов до разрушения металлического образца, полученные при помощи персептрона. Средний уровень погрешности для обучающей и тестовой выборки соответственно равен 3,30% и 3,53%. При сопоставлении этих данных с результатами построения регрессионной модели, наблюдается меньший разброс между наблюдаемой и предсказанной величиной, а также повышение точности определения параметра $n/n_{разр}$. Применение нейронных сетей позволяет определить нелинейные взаимосвязи между $n/n_{разр}$ и стандартными АЭ параметрами, значения которых могут значительно изменяться при развитии дефектов структуры металла или повышении энергии шумовых сигналов. Таким образом, более точное определение количества циклов до разрушения технических устройств достигается при помощи математических моделей, реализованных на основе нейронных сетей.

5.5 Выводы

В рамках настоящего раздела проведено исследование и классификация шумовых источников акустических сигналов, усложняющих процедуру АЭ диагностики. Разработан алгоритм фильтрации шумов, обусловленных структурной неоднородностью контролируемых объектов.

Изучены основные методики устранения помех, одной из которых является синтез оптимального фильтра Колмогорова-Винера. Разработка

фильтра осуществлялась для помех, соответствующих таким мешающим факторам как трение, перемешивание и утечка. Наилучший результат был получен при фильтрации течевых сигналов, для которых значения соотношения сигнал-шум возросло на два порядка.

На заключительном этапе проведена разработка математических моделей оценки параметра $n/n_{разр}$ для металлических образцов. Разработана регрессионная модель, позволяющая оценивать относительное количество циклов до разрушения со средней погрешностью 4,2 %. Коэффициент детерминации R^2 равный 0,963 и статистика Фишера $F=9365$ свидетельствуют о высокой достоверности полученной модели.

Для уточнения результата прогнозирования количества циклов до разрушения была обучена нейронная сеть. Для решения поставленной задачи использовался многослойный персептрон с одним скрытым слоем и 10 нейронами. Функция активации скрытых нейронов была гиперболической, а для выходных – логистической. Согласно результатам расчета параметр ошибки обучения на 10-ой эпохе не превышал 0,01 как на тестовой, так и на обучающей выборке. При этом средний уровень ошибки для обучающей и тестовой выборки на заключительной эпохе соответственно равен 3,30% и 3,53%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1) В рамках лабораторных экспериментов по циклическому нагружению образцов с боковым надрезом из стали 09Г2С получены результаты сопоставления параметров потока акустических сигналов и основных стадий КДУР. Отмечается, что стадия устойчивого развития дефекта приводит к появлению импульсов АЭ, активность которых достигает 5 имп/цикл, а значения амплитуды не превышают 65 дБ. При переходе к этапу ускоренного роста УТ зарегистрирован характерный рост АЭ активности и амплитуды до 85 имп/цикл и 102 дБ соответственно.

2) Сравнительный анализ результатов фрактографического анализа и АЭ данных позволил сопоставить особенности структуры материала и АЭ параметров. Присутствие в центральной части (по толщине) изделия перлитных полос, совпадающих с направлением проката, приводит к образованию дополнительных концентраторов напряжений. В связи с этим средняя АЭ активность увеличивается до 10 имп/цикл. Присутствие неметаллических включений в структуре металла также влияет на результат АЭ диагностики. При помощи металлографического анализа установлено, что неметаллические включения размером 50х50 мм могут приводить к кратковременному увеличению амплитуды акустических сигналов до 70 дБ.

3) На начальном этапе развития УТ, при котором уровень деформации изделия достаточно низкий, возникает эффект Элбера – смыкание берегов УТ. Согласно результатам обработки акустических сигналов, этот процесс приводит к появлению «вторичных» источников АЭ. Сигналы от таких источников могут достигать 70 дБ, что усложняет процедуру диагностики и оценку состояния объекта контроля. Необходимо отметить, что на этапе ускоренного развития УТ эффекта смыкания берегов не наблюдается.

4) Разработан способ фильтрации «вторичных» источников АЭ, затрудняющих процедуру диагностики. Способ основан на применении непараметрической статистики Колмогорова-Смирнова, по значениям

которой определяется момент разладки амплитудного распределения. Расчет функции ошибки позволяет оценить диапазон амплитуд акустических сигналов, соответствующих «вторичным» источникам АЭ. В результате применения разработанной методики удалось устранить свыше 60% сигналов независимо от амплитуды и длительности шумового процесса.

5) Разработана методика оценки стадии развития УТ, которая основана на разделении кластеров, соответствующих стабильному и ускоренному росту дефекта. Для реализации такого подхода проводится построение критериальной плоскости, на которой ось абсцисс соответствует $\log_{10}(T/\Delta t)$, а ось ординат – $\log_{10}(\sum u_{mkv})$. Применение разработанной методики позволяет определить стадию развития УТ независимо от уровня скорости изменения и максимального значения нагрузки. Для стадии стабильного роста УТ параметры $\log_{10}(T/\Delta t)$ и $\log_{10}(\sum u_{mkv})$ не превышают значений 1 и 3 соответственно. Дальнейшее развитие дефекта приводит к ускоренному накоплению повреждений и увеличению значений критериальных параметров.

6) Рассчитана вероятность выявления УТ при различных значениях амплитуды шумовых сигналов и удаленности приемного преобразователя от местоположения источника АЭ. При рассмотрении параметра выявляемости усталостных повреждений было отмечено, что на этапе стабильного роста вероятность выявления дефекта свыше 95% была зарегистрирована при удаленности приемного ПАЭ на расстоянии 2 метров от источника и значении порога 40 дБ. Аналогичный уровень вероятности выявления УТ для этапа ускоренного роста дефекта был зарегистрирован при следующих параметрах АЭ контроля: удаленность приемного преобразователя – 5 метров, порог – 45 дБ.

8) Проведено исследование результатов применения оптимального фильтра Колмогорова-Винера, для синтеза которого необходимо обладать априорной информацией о спектральных характеристиках «полезных» и шумовых сигналов. Возможность применения такого фильтра

рассматривалась на математических моделях, представляющие собой импульс АЭ на фоне шумовых сигналов. В качестве шума использовались сигналы от процессов трения, утечки и перемешивания, зарегистрированные при эксплуатации реальных технических устройств. Применение оптимального фильтра показало, что наилучший результат соответствует фильтрации течевых сигналов, для которых соотношение сигнал-шум увеличилось на два порядка.

9) Разработана прогностическая модель АЭ оценки количества циклов до разрушения изделия, основанная на синтезе нейронной сети (персептрон), состоящей из 1 скрытого слоя с 10 нейронами, при этом функция активации скрытых нейронов соответствовала гиперболической, а для выходных – логистической. Применение математической модели позволило оценить значение циклов до разрушения со средней погрешностью 3,30% ($n/n_{разр}$) независимо от максимальной нагрузки цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашова О.Г., Назарова М.Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. 2004. №2. URL: http://ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf.
2. Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Кольцов В.Г., Барат В.А., Ростовцев М.Ю. Новый портативный инструмент «UNISCOPE» для неразрушающего контроля // Химическая техника. 2011. №8. С. 34.
3. Махутов Н.А., Воробьев А.З., Гаденин М.М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении.: Наука, 1983. 272 с.
4. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // СФЕРА. Нефть и Газ. 2010. №1. С. 26-37.
5. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // Инженерный вестник. 2015. №1. С. 533-538.
6. Muravin B. Acoustic emission method for diagnostics and structural health monitoring of critical structures during operation // HDKBR INFO Magazin. 2012. vol. 2. №3. p. 2-7.
7. Шайбаков Р.А., Давыдова Д.Г., Кузьмин А.Н., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров // Нефтегазовое дело. 2013. №4. С. 448-464.
8. Приорова Е.М., Приоров Г.Е., Панфиленко В.А. Экологические проблемы и обеспечение экологической безопасности в Российской Федерации // Техносферная безопасность. 2018. №1(18). С. 92-97.
9. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.
10. Иоффе А.В., Ревякин В.А., Князькин С.А. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и западной Сибири // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. №4. С. 50-54.

11. Холдин Р.С., Анищенко Ю.А. Проблемы и тенденции развития авиационной промышленности России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 2. №8. С. 78-79.
12. Шерстобитова А.А., Феткуллова Э.Т. Химическая промышленность и современные проблемы ее развития в Российской Федерации // Вестник НГИЭН. 2015. №3(46). С. 96-100.
13. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ, с изм. и доп. от 07.08.2000, 10.01.2003, 22.08.2004, 09.05.2005, 18.12.2006, 30.12.2008.
14. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие понятия.
15. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
16. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
17. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.
18. Николайчук А.Н., Дорошев Ю.С. Методы вибродиагностики электрических машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №6. С. 38-51.
19. Троицкий-Марков Р.Т. Тепловой контроль технического состояния электрооборудования с целью обеспечения электробезопасности и пожаробезопасности // Энергобезопасность в документах и фактах. 2008. №3. С. 30-33.
20. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005, – 340 с.
21. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

22. ГОСТ Р исо 22096-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии.
23. Терентьев В.Ф., Билы М. К вопросу о построении полной кривой усталости. Сообщение 1, 2 // Проблемы прочности. 1972. №6. С. 12-22; Сообщение №3. 1973. №2. С. 27-31.
24. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. – 479 с.
25. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М., Metallurgia, 1975. 456 с.
26. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
27. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
28. Махутов Н.А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов // Заводская лаборатория. 2004. Т. 40. №4. С. 37-41.
29. Ritchie R.O., Lankford J. Small fatigue cracks: A statement of the problem and potential solutions // Materials Science and Engineering, 84(1986), P. 11-16.
30. Халл. Д. Введение в дислокации. М.:Атомиздат. 1968. 280 с.
31. Cottrell A.H. Trans. Inst. Min. (Metall.) Engrs. 212, 1958. P. 192.
32. Котрелл А.Х. Теоретические аспекты процесса разрушения / Атомный механизм разрушения. М.: Metallurgizdat. 1963. С. 30-68.
33. Heinz A, Neumann P. Crack initiation during high cycle fatigue of an austenitic steel. Acta Metall Mater. 1990; 38:1933–40.
34. Tokaji K., Ogawa T., Ohya K. The effect of grain size on small fatigue crack growth in pure titanium // «International Journal of Fatigue». 1994. Volume 16. Issue 8. P. 571-578.

35. De Los Rios E. R., Trull M. and Levers A. Modelling fatigue crack growth in shot-peened components of Al 2024-T351, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 23, 8, (709-716), (2001).
36. Liaw P.K., Leax T.R., Swaminathan V.P., Donald J.K. Influence of load ratio on near – threshold fatigue crack propagation behavior // *Scr. met.*, 1982. Vol. 16. P. 871-876.
37. Романив О.Н., Ткач А.Н., Симинькович В.Н. Влияние внутренних микронапряжений в мартенсите на припороговый рост усталостных трещин // *Физ.-хим. мех. материалов*. 1982. Т. 18. № 6. С.49-55.
38. Hojo M. Tanaka K., Kakai Y. Rit study of early fatigue crack propagation in 3% silicon iron // *J. Soc. Mater. Sci. Jap.* 1983. Vol. 32. № 358. P. 769-775.
39. Paris P.C., Erdogan F. A critical analysis of crack propagations laws // *J. Basis Eng.* 1963. Vol. 83, N 4. P. 528-534.
40. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
41. Elber W. fatigue crack closure under cyclictension // *Eng. Fracture Mech.* – 1970. - №2. p. 37-45.
42. Newman Eds. J. C., Elber W. Mechanics and physics of crack growth. – Philadelphia: ASTM, 1988. – 668 p.
43. Ярема С.Я. Некоторые вопросы методики испытаний материалов на циклическую трещиностойкость // *Физ.-хим. Механика материалов*. – 1977. - №4. С. 68-77.
44. Kaiser J. Untersuchung uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch: PhD thesis. / J. Kaiser // *Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, AREIA*. 1953. Vol. 24. №1-2. P. 43-45.
45. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.:ил.
46. Харебов В.Г., Жуков А.В., Кузьмин А.Н. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах // *В мире неразрушающего контроля*. 2008. №3(41). С. 24-26.

47. Иванов В.И. О чувствительности приборов акустико-эмиссионного контроля // Тр. Всесоюзной акустической конференции. М.: 1983. С. 75-77.
48. Степанова Л.Н., Чаплыгин В.Н., Кабанов С.И. и др. Исследование связи информативных параметров сигналов акустической эмиссии с процессом разрушения образцов с дефектами сварки // Дефектоскопия. 2012. №6. С. 11-21.
49. Носов В.В., Ярмилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении // Деформация и разрушение материалов. 2016. №11. С. 38-45.
50. Sagaidak A.I., Bardakov V.V., Elizarov S.V., Terentyev D.A. The Use of Acoustic Emission Method in the Modern Construction. — 8 p. Conference of the European Working Group on Acoustic Emission – Fr.1.A.3, 2014.
51. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Хафизов М.В., Колпаков В.И. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №1(670). С. 71-77.
52. Зеленский В.А., Анкудинов А.Б., Пенкин А.Г., Чернов А.И., Алымов М.И. Акустическая эмиссия при жидкофазном спекании бинарной системы W+20% нано Cu // Физика и химия обработки материалов. 2010. №3. С.79-83.
53. Шнайдер Л.А., Кулешов В.К. Возможность акустико-эмиссионного мониторинга потенциально опасных узлов и участков линейной части магистральных нефтепродуктов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2002. №5. С. 143-146.
54. Шайбаков Р.А., Давыдова Д.Г., Кузьмин А.Н., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров // Нефтегазовое дело. 2013. №4. С. 448-464.

55. Шемякин В.В., Стрижков С.А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2004. №4. С. 16-19.

56. Барат В.А., Алякритский А.Л. Метод статистической обработки данных акустико-эмиссионного мониторинга на примере реактора гидроочистки Мозырского НПЗ // В мире неразрушающего контроля. 2008. №4(42). С. 52-55.

57. Линдеров М., Зегель К., Виноградов А., Вайднер А., Бирман Х. Особенности деформации ТРИП/ТВИП сталей при различных температурах по данным акустической эмиссии // Вектор науки ТГУ. 2013. №3. С. 208-212.

58. Martinez-Gonzalez E., Picas I., Romeu J. and Casellas D. Filtering of Acoustic Emission Signals for the Accurate Identification of Fracture Mechanisms in Bending Tests // Materials Transactions, Vol. 54, No. 7 (2013). pp. 1087-1094.

59. SAGASTA Francisco A., TORN'E Juan L., ANCHEZ-PAREJO Antonio S., GALLEGO A. Discrimination of Acoustic Emission Signals for Damage Assessment in a Reinforced Concrete Slab Subjected to Seismic Simulations // ARCHIVES OF ACOUSTICS. 2013. Vol. 38. No. 3. pp. 303–310.

60. Holford Karen M., Eatona Mark J., Hensman James J., Pullin R., Evans Sam L., Dervilis N., Worden K. A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview // Progress in Aerospace Sciences. 2017. № 90. pp. 1–11.

61. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 108 с.

62. Sagar R.V. Importance of acoustic emission based *b*-value in the study of fracture process in reinforced concrete structures // 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9. May 2016. DOI 10.21012/FC9.040.

63. Ono K. Application of acoustic emission for structure diagnosis // Diagnostyka – Diagnostics and structural health monitoring 2. 2011. pp. 3-17.

64. Rao M. and Lakshmi K. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current Science*. 2005. №89. pp. 1577–1582.

65. Dunegan H.L., Harris D.O. Acoustic emission – A new non-destructive testing tool // *Ultrasonic*. 1969. № 7. p. 160-166.

66. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission // *Engineering fracture mechanics*. 1968. V. 1. N. 1. P. 105-122.

67. Стрижайло В.А., Добровольский Ю.В., Стрельченко В.А. и др. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. Киев: Наук. думка, 1990. 232 с.

68. NDIS 2421 (2000), Recommended Practice for In-Situ Monitoring of Concrete Structures by AE, Japanese Society for Nondestructive Inspection.

69. Ohtsu, M., Uchida, M., Okamoto, T. and Yuyama, S. (2002), "Damage assessment of reinforced concrete beams qualified by acoustic emission", *ACI Structural Journal*. Vol. 99. No. 4. P. 411-417.

70. Ковалев Д.Н., Нефедьев Е.Ю., Ткачев В.Г. Акустико-эмиссионный контроль испытаний стальной гофрированной трубы при циклическом и статическом нагружении // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2012. №2. С. 382-390.

71. Черняева Е.В., Галкин Д.И., Бигус Г.А., Мерсон Д.Л. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости // *Сварка и диагностика*. 2010. №2. С. 50-56.

72. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A., Hu. M. Study of the kinetic of fatigue fracture of titanium alloys by acoustic emission // *Modern materials and technologies*. 2013. №1. С. 20-25.

73. Marfo A., Chen Z., Li J. Acoustic emission analysis of fatigue crack growth in steel structures // *Journal of civil engineering and construction Technology*. 2013. Vol. 4(7). P. 239-249.

74. Петерсен Т.Б. Обработка и интерпретация данных акустической эмиссии и электронной микроскопии для оценки повреждаемости металлов: Дис ... канд. техн. наук. – М., 1997. – 154 с.

75. Abhijeet J. Koranne, Jaydeep A. Kachare, Sanket A. Jadhav Fatigue crack analysis using acoustic emission // International research journal of engineering and technology (IRJET). 2017. Vol. 04(01). P. 1177-1180.

76. Azadeh Keshtgar, Mohammad Modarres Detecting crack initiation based on acoustic emission // Chemical engineering transactions. 2013. Vol.33, P. 547-552.

77. Ido N., Tagami M., Katou K., Tsuji T. Evaluation of fatigue crack propagation rate by acoustic emission method // 7th International conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components. – Yokohama, Japan. – May 12-15, 2009. – JRC-NDE 2009.

78. Fady F. Barsoum, Jamil Suleman, Andrej Korcak, Eric V. K. Hill. Acoustic emission monitoring and fatigue life prediction in axially loaded notched steel specimens // Journal of acoustic emission. 2009. Vol. 27. P. 40-63.

79. Igor Varfolomeev, Michael Luke, Sergii Moroz Experimental and numerical investigation of fatigue crack growth in various specimen geometries // Procedia Engineering. Vol. 2(2010). P. 1829-1837.

80. Magnus Hörnqvist, Thomas Hansson, Olle Clevfors Fatigue crack growth testing using varying R-ratios // Procedia Engineering. Vol. 2(2010). P. 155-161.

81. Dimitrios G. Aggelis, Evangelios Z. Kordatos, Theodore E. Matikas Monitoring of metal fatigue damage using acoustic emission and thermography // Journal of acoustic emission. 2011. Vol. 29. P.113-122.

82. Claudia Barile, Caterina Casavola, Giovanni Pappalettera, Carmine Pappalettere Fatigue damage monitoring by means of acoustic emission and thermography in Ti grade 5 specimens // Procedia Engineering. Vol. 114(2015). P. 487-492.

83. Zain M.S.M., Jamaludin N., Sajuri Z., Yusof M.F.M., Hanafi Z.H. Acoustic emission study of fatigue crack growth in rail track material // National

Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010) 3-4 December 2010, Faculty of Mechanical Engineering, UMP Pekan, Kuantan, Pahang, Malaysia; pp. 82-90.

84. Kostryzhev A. G., Davis, C. L., Roberts C. Detection of crack growth in rail steel using acoustic emission // *Ironmaking and Steelmaking*. 2013. Vol. 40 (2), P. 98-102.

85. Qiong Ai, Cai-Xue Liu, Xiang-Rong Chen, Pan He, Yao Wang Acoustic emission of fatigue crack in pressure pipe under cyclic pressure // *Nuclear Engineering and Design*. 2010. Vol. 240. P. 3616-3620.

86. Rogers L.M., Stambaugh K. Application of acoustic emission technology for health monitoring of ship structures // *Ship Structure Committee*, Baltimore, Maryland, 2014.

87. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов. Изд-во стандартов, 1976.

88. Yu Jiang, FeiYun Xu Research on Source Location from Acoustic Emission Tomography // 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada, 12-15 September 2012.

89. Шпонько А.А., Шумова Л.В. Метод расчета координат источников акустической эмиссии в объеме контролируемого объекта // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2008. №2. С. 79-81.

90. Терентьев Д.А., Елизаров С.В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах. – *Контроль. Диагностика*, 2008, №7, с. 51-54.

91. 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.

92. ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия (с Изменениями N 1, 2).

93. ГОСТ Р 52910-2008 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.
94. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328.
95. Ботвина Л.Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. 2011. №10. С. 5-18
96. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 330 с.
97. Быков С.П., Иванов В.И. Акустическая эмиссия при росте трещин в вязкоупругом материале // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №9. 2008. Том 74. С. 47-52.
98. V. A. Barat, D. V. Chernov, S. V. Elizarov. Discovering data flow discords for enhancing noise immunity of acoustic-emission testing // Russian Journal of Nondestructive Testing, June 2016, Volume 52, Issue 6, p.p. 347-356.
99. I. V. Sokolov, V. M. Matyunin, V. A. Barat, D. V. Chernov and A. Y. Marchenkov. Advanced Filtering Methods Application for Sensitivity Enhancement during AE Testing of Operating Structures // Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(42), November 2016.
100. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // J. Acoustic emission. 2010. №28. P. 109-119.
101. Елизаров С.В., Барат В.А., Чернов Д.В. Исследование способов оценки состояния промышленных объектов по результатам акустико-эмиссионного контроля. // IV Международная научно-практическая конференция «Акустическая эмиссия. Возможности метода в условиях современного риск-ориентированного подхода к обеспечению безопасности производственных и социально значимых объектов», 10-14 ноября 2014 года. С. 162-170.
102. Сун Гуохао, Ван Жепьсинь, Копг Делянь, Бай Миньгинь, Жоу Янг, Ксу Феньжипь, Пан Жиажень. Анализ характеристик акустических сигналов

от усталостных трещин в якорной структуре укрепленной кабелями башни моста // Дефектоскопия. 2012. №12. С. 82-95.

103. Аффифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 488 с., ил.

104. Барат В.А. Информационные аспекты акустико-эмиссионного контроля: учеб. пособие / В.А. Барат, В.И. Иванов, Д.В. Чернов. – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 80 с.

105. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2008. № 1. С. 15 -19.

106. Марчук В.И. Первичная обработка результатов измерений при ограниченном объеме априорной информации: Монография / Под ред. К.Е. Румянцева. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2003. – 160 с.

107. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования.// М.: Вузовская книга, 2002.

108. С. В. Елизаров, В. А. Барат, В. В. Бардаков, Д. В. Чернов, Д. А. Терентьев АЭ-контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 4 – 11.

109. Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Издательство «Экзамен», 2004. 656 с.

110. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.

Приложение А – Акт внедрения ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ»



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Разработка методов диагностики усталостных трещин с помощью акустической эмиссии» на соискание ученой степени кандидата технических наук Чернова Дмитрия Витальевича

Настоящий акт, подтверждает, что результаты диссертационной работы Чернова Дмитрия Витальевича «Разработка методов диагностики усталостных трещин с помощью акустической эмиссии» были внедрены в состав программ по обработке акустико-эмиссионных данных, регистрируемых измерительной аппаратурой A-Line 32D. Внедренная методика используется для определения стадии развития усталостных трещин, выявляемых при проведении акустико-эмиссионного мониторинга технических изделий, выполненных из конструкционной стали марки 09Г2С.

Генеральный директор ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ»

С.В. Елизаров



«08» августа 2018 г.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ИНТЕРЮНИС-ИТ»

Адрес: РФ, 111024, г. Москва
Шоссе Энтузиастов, д. 20Б, а/я 140
Тел.: + 7 (495) 361-7673, 361-1990

Почта: sales@interunis-it.ru
Сайт: www.interunis-it.ru
Skype: interunis_co

ИНН 7701945042
КПП 772201001
ОКПО 38265400

Приложение Б – Акт внедрения ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

 В.К. Драгунов

 2018 г



АКТ

об использовании в учебном процессе материалов кандидатской диссертации «Разработка методов диагностики усталостных трещин с помощью акустической эмиссии» аспиранта кафедры «Электротехники и Интроскопии» Чернова Дмитрия Витальевича

Комиссия в составе: председатель – зав. кафедрой «Электротехники и Интроскопии», д.т.н., доцент В.П. Лунин, члены комиссии – профессор кафедры «Электротехники и Интроскопии», д.т.н. А.А. Самокрутов, доцент кафедры «Электротехники и Интроскопии» к.т.н. В.А. Барат составили настоящий акт о том, что материалы кандидатской диссертации аспиранта кафедры «Электротехники и Интроскопии» включены в учебное пособие «Информационные аспекты акустико-эмиссионного контроля». Учебное пособие используется при изучении дисциплины «Информационные технологии в приборостроении» при подготовке студентов, обучающихся по направлению «Приборостроение» профиля «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Председатель комиссии



В.П. Лунин

Члены Комиссии



А.А. Самокрутов



В.А. Барат