

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»**

На правах рукописи

ЗЕЛЕНСКИЙ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ
СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

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

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор В. В. Носов**

Санкт-Петербург- 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	11
1.1 Анализ состояния элементов конструкций глубоководных сооружений.....	11
1.2 Анализ методов контроля состояния и повышения прочностной надёжности элементов конструкций глубоководных сооружений.....	24
1.3 Постановка вопроса, формулировка цели и задач, методология исследований.....	32
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	34
2.1 Явление акустической эмиссии как средство наблюдения за процессом разрушения и принципы оптимизации акустико- эмиссионного контроля прочности.....	34
2.2 Неразрушающий контроль состояния сосудов и кольцевых элементов конструкций, работающих под давлением.....	47
2.3 Микромеханическая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии и физические основы долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса.....	50
Выводы по главе 2.....	70
ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ СЛОЖНО НАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ АЭ-ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....	71

3.1 Метрологические аспекты акустико-эмиссионной оценки концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочности.....	71
3.2 Анализ применения концентрационно-кинетических АЭ показателей для оценки прочности промышленных объектов.....	81
Выводы по главе 3.....	87
ГЛАВА 4 ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СЖИМАЕМЫХ СВАРНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ И АНАЛИЗ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	89
4.1 Методика экспериментальных исследований.....	89
4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований.....	97
4.3 Акустико-эмиссионный контроль степени опасности дефектов сжимаемых кольцевых образцов сварных соединений.....	108
Выводы по главе 4.....	117
ГЛАВА 5 МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	119
5.1 Основные параметры прочностного контроля элементов конструкций глубоководных сооружений.....	119
5.2 Способ оценки прочности сварных элементов и допустимой глубины погружения конструкций глубоководных сооружений на основе акустико-эмиссионного контроля.....	122
5.3 Методика неразрушающего контроля прочности элементов основного корпуса глубоководного аппарата.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Контроль состояния сложно нагруженных технических объектов ответственного назначения является обязательным этапом в обеспечении их надёжности. Особенно это касается глубоководных сооружений, эксплуатируемым в условиях ограниченного доступа к обслуживанию и находящимся под воздействием сжимающих нагрузок. Исследование подводного мира, освоение полезных ископаемых в области северных шельфов, решение вопросов поставок газа и нефти на отделённые водными преградами территории привели к расширенному применению глубоководных аппаратов и оборудования, водолазных камер, протяжённых подводных нефте- и газопроводов, строительных конструкций, и, как следствие, к необходимости совершенствования методов контроля их состояния.

В процессе эксплуатации элементы конструкций глубоководных сооружений подвергаются, сжимающим, изгибающим, растягивающим статическим и циклическим нагрузкам, создающим сложное неоднородное состояние. Глубоководные аппараты осуществляют многоразовые погружения и всплытия, что обеспечивается оптимальными соотношениями определяющих удельный вес и прочность геометрических параметров. Отклонение от этих соотношений снижает безопасность эксплуатации и ресурс, что делает актуальной задачу контроля и стабилизации прочностных и геометрических параметров.

Основной особенностью контроля состояния конструкций глубоководных сооружений является повышенное внимание к опасности потери устойчивости, смятия или усталостного разрушения. Прочностная неоднородность материала элементов конструкций и некорректное упрощение трудоёмких прочностных испытаний приводят к снижению информативности рекомендованных Правилами методов контроля и необходимости их совершенствования. В качестве основы такого совершенствования принимаются возможности метода акустической эмиссии (АЭ), как одного из методов контроля за

приводящим к потере прочности процессом накопления повреждений. Однако применение стандартных акустико-эмиссионных методик и критериев оценки состояния и ресурса для сжимаемых элементов конструкций глубоководных сооружений не даёт ожидаемого результата, что предполагает необходимость разработки новых технологий АЭ контроля.

Идея работы: контроль состояния, оценка степени опасности дефектов и определение ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений должны производиться на основе наблюдения за определяющим ресурс разрушением с учетом неоднородности структуры материала и неустойчивостью деформированного состояния посредством регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе корректного экспресс-нагружения и определения представительных АЭ показателей прочности.

Объектом исследования являются сварные корпусные элементы конструкций глубоководных сооружений.

Предметом исследования является метод акустико-эмиссионного неразрушающего экспресс-контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений.

Цель работы состояла в обосновании метода неразрушающего контроля прочности и оценки ресурса корпусных элементов глубоководных сооружений на основе оперативного АЭ контроля за процессом их разрушения в процессе корректного и технологически упрощённого экспресс-нагружения.

В ходе исследований решались **следующие задачи:**

1. Анализ методов контроля состояния и подходов к оценке работоспособности и обеспечению безопасности эксплуатации элементов глубоководных сооружений, обоснование предпочтительного метода контроля за определяющей работоспособность процессом разрушения;
2. Обоснование принципов оптимизации АЭ контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений на основе формулировки критерия оптимизации и применения обобщённого алгоритма определения

представительного АЭ показателя индивидуальных прочностных характеристик;

3.Экспериментальные исследования и анализ данных регистрации сигналов акустической эмиссии сварных корпусных элементов глубоководных сооружений, оценка влияния дестабилизирующих факторов на точность неразрушающего контроля показателей прочности.

4.Разработка метода неразрушающего контроля прочности и ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений.

Методы исследований опираются на информационно-кинетический подход к разработке технологий АЭ диагностирования, известную микромеханическую модель временных зависимостей параметров АЭ, результаты экспериментальных исследований процесса разрушения и акустической эмиссии конструкционных материалов, статических и усталостных прочностных испытаний, статистического, физического и имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения, анализ напряженного состояния с применением программы Autodesk Inventor Professional со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ ANSYS Design Space. Экспериментальные исследования проведены с использованием сертифицированной автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы на сваренных в единое целое плоских и подобных корпусным элементам глубоководных аппаратов кольцевых образцах с технологическими и искусственно созданными дефектами, механически нагружаемых устройством со специально созданным приспособлением.

Метод разрабатывается с целью расширения возможности неразрушающего контроля за счёт снижения трудоёмкости и повышения информативности контроля. В ходе решения данной проблемы получены следующие, обладающие **научной новизной** результаты:

-сформулирован принцип совершенствования контроля состояния элементов конструкций глубоководных сооружений;

- подготовлены и проведены экспериментальные исследования акустической эмиссии кольцевых образцов стыковых сварных соединений при их сжатии;

- подтверждена представительность АЭ показателей прочности, определяемых с позиции микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ, регистрируемой в процессе обеспечивающего подобие рабочему напряжённому состоянию упрощённого тестового механического воздействия;

- на основе возможности оценки представительных АЭ показателей прочности разработан способ контроля прочности сжимаемых корпусных элементов и основанный на нем метод оценки допустимой глубины погружения глубоководного аппарата. Подана заявка на выдачу патента на изобретение.

По результатам проведённых исследований на защиту выносятся **следующие научные положения:**

1. Совершенствование контроля состояния элементов конструкций глубоководных сооружений следует производить с учётом его многокритериальности на основе анализа данных регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе подобного рабочему тестового механического нагружения с позиций микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ;

2. Неразрушающий контроль прочности элементов конструкций глубоководных сооружений следует производить на основе оценки представительных концентрационно-кинетических АЭ показателей прочности по результатам регистрации сигналов АЭ в процессе сжимающего радиального экспресс-нагружения элемента в направлении наиболее вероятной потери его устойчивости до напряжений ниже предела текучести материала.

Достоверность научных положений подтверждается результатами метрологических проверок, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного модели-

рования, сравнением с результатами, полученными в известных работах, результатами статистической обработки экспериментальных исследований, признанием научной общественностью при выступлениях на конференциях, публикацией результатов в рецензируемых научных журналах.

Практическая ценность результатов обусловлена:

- усовершенствованием метода акустической эмиссии, как метода неразрушающего контроля состояния технических объектов, природной среды, веществ, материалов и изделий с учетом особенностей объектов контроля;
- повышением информативности, снижением трудоёмкость контроля прочности и ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений;
- продлением сроков эксплуатации, повышением допустимой глубины погружения элементов конструкций и оборудования глубоководных сооружений.

Область применения результатов. Результаты исследований могут быть использованы для обеспечения безопасности эксплуатации, увеличения ресурса элементов конструкций и деталей машин различного назначения в различных областях промышленности, в учебном процессе студентов технических специальностей общемашиностроительного и специального значения.

Апробация и внедрение результатов;

Основное содержание диссертационной работы докладывалось на II, III и IV международных научно-практических конференциях «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 2015, 2016 гг, Научном форуме с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2015 год, на XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее– 2015», СПб–ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», на III Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» СПб,

(20-21 октября 2016 г), Санкт-Петербургский горный университет, на II-ой Международной научно-технической конференции «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» (7-9 декабря 2016 г). Работа связана с развитием Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», экспертной оценкой состояния трубопроводов, сосудов давления, результаты внедрены в учебный процесс подготовки магистров и бакалавров по направлению «Приборостроение». Подана заявка на патент, рег.№ 2016112868 от 04.04.2016 на «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата», положительное решение о выдаче патента на изобретение от 23.03.2017.

Личный вклад автора:

- предложена идея тестового нагружения с контролем по двум основным критериям работоспособности элементов глубоководных сооружений;
- разработаны образцы и приспособление для нагружающего устройства, осуществляющего сжимающее нагружение аналогов элементов прочного корпуса глубоководного аппарата;
- произведён анализ напряжённого состояния и выполнены расчеты максимальных напряжений возле дефектов с применением программы Autodesk Inventor Professional со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ ANSYS Design Space;
- проведены эксперименты по выявлению возможности прочностного контроля сжимаемых корпусных элементов их результатов с позиций микро-механической модели с применением оптимальной фильтрации сигналов и имитационного компьютерного моделирования;
- установлены зависимости между представительными параметрами АЭ контроля, степенью опасности дефектов и стандартными характеристиками прочности сварных соединений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрразования РФ и 1 в издании, цитируемой в БД Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5-и глав, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 174 страниц, содержит 46 рисунков, 12 таблиц, 196 библиографических источника.

Работа является продолжением направления, защищенного ранее в диссертациях Носова В.В. (1988г., 1997 г), Буракова И.Н. (2004 г), Ельчанинова Г.С. (2011 г.), Лаврина В.Г. (2011 г), Лаховой Е.Н. (2012 г.). Большой вклад в решение проблемы неразрушающего контроля и диагностики, метода акустической эмиссии и методологии оценки прочности различного рода материалов и технических объектов внесён такими учёными, как Иванов В.И., Грешников В.А., Дробот Ю.В, Башкарёв А.Я., Ключев В.В., Потапов А.И., Савельев В.Н., Недосека А.Я., Нефедьев Е.Ю., Махмудов Х. В., Трипалин А.С, Буйло С.И., Елизаров С.В., Барат В.А., Баранов В.М., Бырин В.Н. Бигус Г.А., Журков С.Н., Регель В.Р., Слуцкер А.К., Томашевский Э.Е., Куксенко В.С., Петров В.А., Веттегрень В.И., Патон Б.Е., Махутов Н.А., Алёшин Н.П., Павлов П.А., Мельников Б.Е., Гецов Л.Б., Судаков А.В., Жуков В.А., и др.

Диссертация соответствует 1 и 2 пунктам паспорта специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: п.1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», п.2 «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля».

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

1.1. Анализ состояния элементов конструкций глубоководных сооружений.

Контроль состояния сложно нагруженных технических объектов ответственного назначения является обязательным этапом в обеспечении их надёжности. Особенно это касается средств, эксплуатируемых в условиях ограниченного доступа к обслуживанию и находящимся под воздействием сжимающих нагрузок. Исследование подводного мира, освоение полезных ископаемых в области северных шельфов, решение вопросов поставок газа и нефти на отделённые водными преградами территории привели к расширенному применению работающих на сжатие элементов, транспортирующих аппаратов, водолазных камер, оборудования, протяжённых подводных нефте- и газопроводов, строительных сооружений, необходимости совершенствования методов контроля их состояния.

Для подводной транспортировки и хранения нефте- газо- продуктов применяют трубопроводы, резервуары, подводные аппараты. Последние используют также для передвижения экипажей. В настоящее время наиболее близок к осуществлению проект «Голубой поток», предусматривающий строительство морского участка газопровода Россия-Турция по дну Черного моря. Помимо высокого содержания сероводорода в воде Черного моря, основной проблемой строительства газопровода Россия-Турция является чрезвычайно большая глубина воды [30, 103]. Аналогов строительства трубопроводов и других инженерных сооружений на таких глубинах в мировой практике ещё не было. Сейчас ведутся активные разработки глубоководных автономных сооружений для работы на морском дне. Вновь созданные детали и элементы конструкции проверяют в специальных камерах в течение

нескольких месяцев на статическую и циклическую прочность под давлением 460 бар [178]. Именно такое давление соответствует глубинам от 4000 до 5000 метров. Уже есть положительные результаты испытаний, которые говорят о том, что глубоководное оборудование выдержит любые нагрузки и его долговечность может составлять до 20 лет. Ряд компаний собирается начать эксплуатацию первых подводных фабрик, добывающих полезные ископаемые на морских глубинах, уже к 2020 году. Сейчас подобные работы могут вестись только на небольшой глубине, а добычи газа и нефти составляют около 40%. При этом используется неудобная система кабелей и труб, которые засоряют морское дно. При глубоководных работах с новейшим разрабатываемым оборудованием есть возможность вполнину увеличить процент добычи полезных ископаемых. Можно отказаться от неудобных труб и качать нефть и газ сразу из скважин, тут же сжимая его и отправляя на поверхность глубоководными аппаратами. По завершению исследований планируется приступить к организации производства подводных фабрик в серийном масштабе.

Одним из наиболее сложных глубоководных сооружений является глубоководный аппарат. Это небольшое судно или техническое устройство, используемое для выполнения разнообразных задач в толще воды и на морском дне. Глубоководные аппараты могут работать на глубине недоступной для водолазов. Основными частями глубоководного аппарата являются наружный корпус, прочный (основной) корпус, несущая рама, прочные и легкие цистерны, а также оборудование необходимое для функционирования аппарата на глубине и обеспечения работоспособности экипажа (рисунок 1.1). Прочный корпус, предназначенный для размещения экипажа, электронного и некоторого другого оборудования обитаемого подводного аппарата, является его основным конструктивным элементом, и, в частности, для подводных лодок представляет собою соединение круговых цилиндров или конических колец оболочки, называемых обечайками, подкрепленных

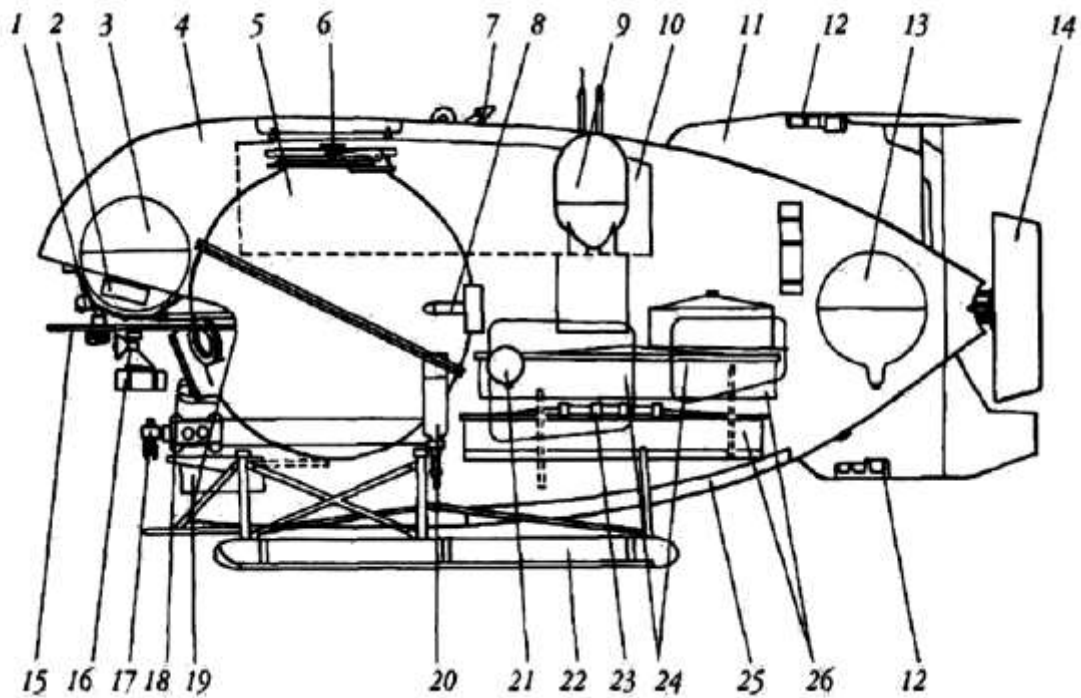


Рисунок 1.1. Схематичный продольный разрез подводного аппарата.

1-гидролактор, 2- фотовспышка; 3- носовая балластная сфера; 4-лёгкий корпус; 5-прочный корпус; 6-люк; 7-рым; 8-боковые движители; 9-аварийный буй; 10-цистерна главного балласта; 11-стабилизатор; 12-гидрофоны; 13-кормовая балластная цистерна; 14-маршевый движитель; 15-поворотная штанга; 16-поворотная рама; 17-манипулятор; 18-датчик системы сбора данных; 19-бункер для образцов; 20-бункер с дробью; 21-балон воздуха высокого давления; 22- лыжи; 23-насос морской воды; 24- технологические лючки; 25- сбрасываемая часть лёгкого корпуса; 26- аккумуляторные боксы.

поперечными ребрами жесткости — шпангоутами. В процессе эксплуатации он подвергается воздействию огромных гидростатических давлений, влиянию перепада температур, вибрации, волновым нагрузкам, ударам о грунт, коррозии, воздействию микроорганизмов и т. д. Решающее требование, определяющее выбор формы корпуса подводного аппарата - обеспечение минимальной массы при заданных объеме и прочности. Прочный корпус может быть сферическим, эллипсоидальным, цилиндрическим с полусферическими оконечностями. Сферическая форма прочного корпуса обеспечивает минимальное соотношение его массы и объема. При одинаковых водоизмещении, рабочей глубине погружения и материалах масса прочного корпуса сферической формы на 15 % меньше, чем масса цилиндрического. Кроме того, сферическая конструкция корпуса обладает наибольшей устойчивостью и принципиально не требует подкреплений. Конструкции, состоящие из нескольких соединенных между собой тел вращения, создаются при необходимости увеличения полезного объема для размещения экипажа и аппаратуры без значительного увеличения диаметра прочного корпуса. Как правило, в этом случае носовая сфера является отсеком управления, а остальные — энергетическим, водолазным и другими.

В зарубежном подводном кораблестроении нашли применение также прочные корпуса с поперечными сечениями, имеющими вид овала и вертикальной или горизонтальной «восьмерки» (рисунок 1.2). Шпангоуты прочного корпуса имеют в сечении вид таврового профиля и поставлены внутри или снаружи корпуса. Наружный набор улучшает условия использования внутренних объемов и выполняет одновременно роль набора легкого корпуса. Для однокорпусных конструкций обычно применяют внутренние, а для двухкорпусных — наружные шпангоуты.

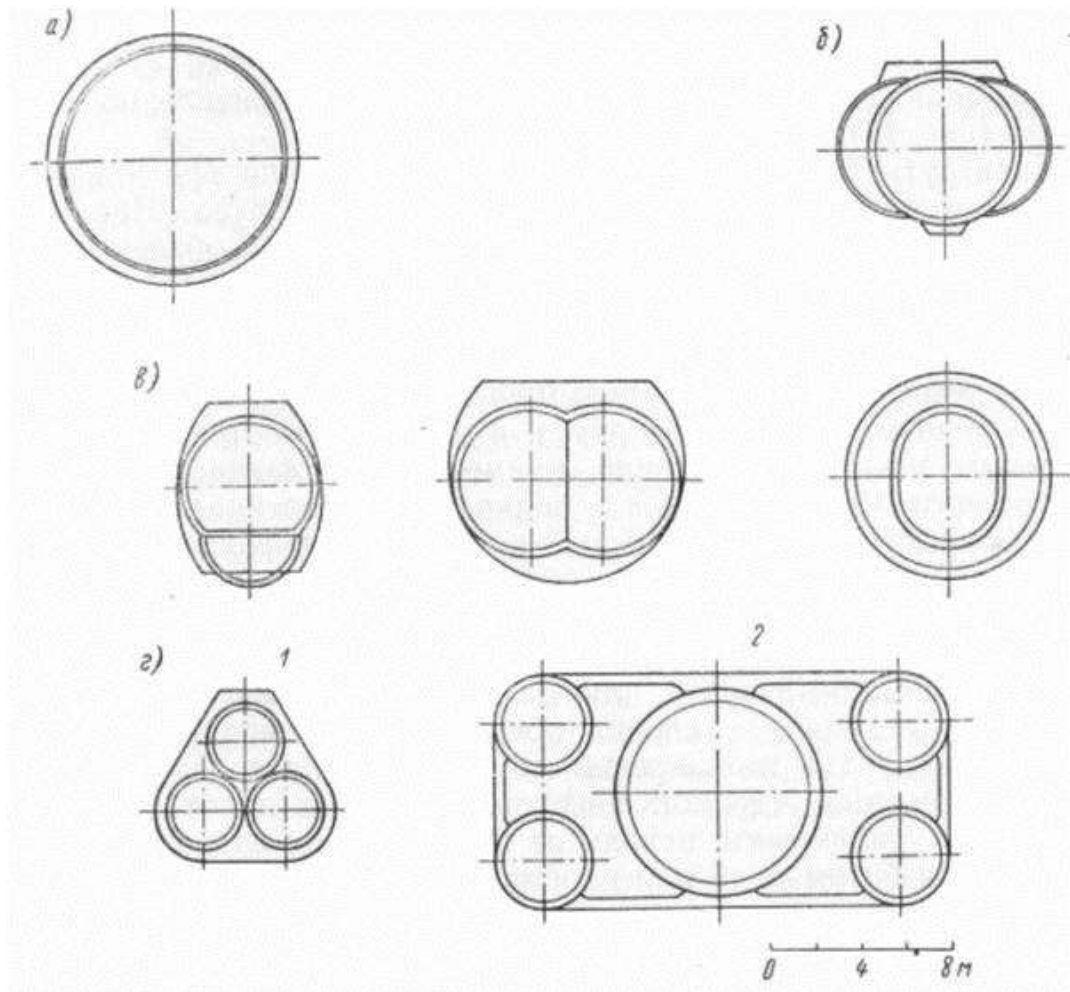


Рисунок 1.2. Конструкции поперечных сечений подводных лодок: а — однокорпусной; б — полуторакорпусной; в — двухкорпусной; г — многокорпусных. 1 — голландская подводная лодка «Дельфин» 2 — проект подводного танкера (США).

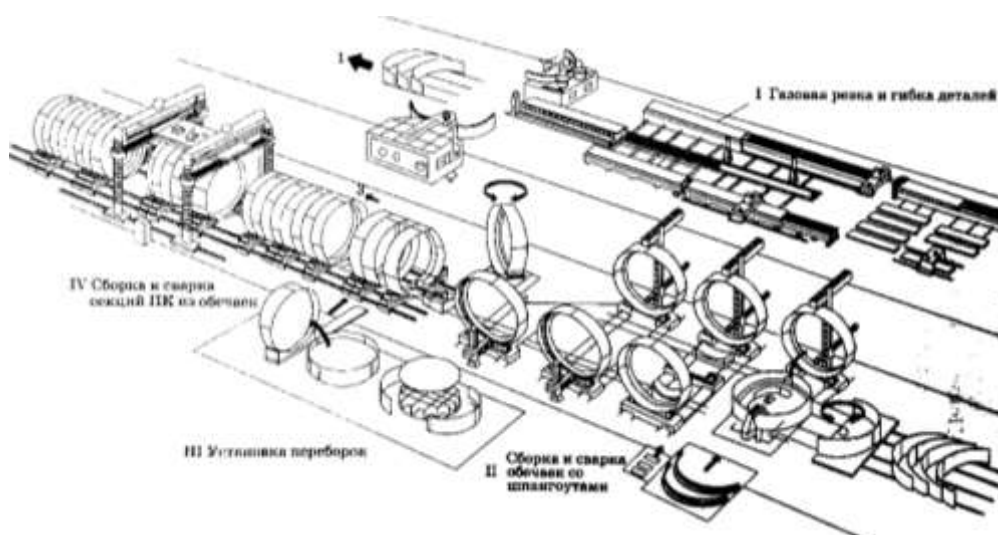
Основным материалом глубоководных аппаратов является сталь. Трубы для подводных газопроводов и нефтепроводов изготавливают преимущественно из низколегированной стали. Корпуса некоторых аппаратов изготавливают из сплавов на основе титана с добавкой алюминия, молибдена, ванадия, хрома, марганца, железа, олова и других элементов. Они обладают плотностью $4,5 \text{ тм}^3$ и в 1,8 раза большей удельной прочностью по сравнению со сталью, более низким коэффициентом линейного расширения, высокой коррозионной стойкостью и маломagnetностью. Корпуса аппаратов, изготовленных из титановых сплавов, благодаря высокой удельной прочности этого материала имеют меньшую массу, чем стальные аналогичных размеров, а, следовательно, позволяют нести большую полезную нагрузку. Еще более легким, чем титан, материалом, пригодным для изготовления прочных корпусов, являются алюминий и его сплавы. Однако сложность выполнения прочных сварных соединений, низкий модуль упругости алюминиевых сплавов привели к тому, что в США и других странах интерес к изготовлению прочных корпусов из этих материалов заметно снизился. Все большее внимание проявляется к неметаллическим конструкционным материалам — гомогенным или композиционным. Применение новых материалов наряду с созданием оптимальных конструкций прочных корпусов подводных аппаратов позволяет существенно увеличить рабочие глубины погружения. Для этой цели выбирают материалы, имеющие высокую удельную прочность (отношение предела текучести к плотности материала) и другие высокие характеристики, например, ударную вязкость, усталостную прочность, пластичность, свариваемость, обрабатываемость, коррозионную стойкость в морской воде и т. д. Для большинства построенных и строящихся американских аппаратов основным конструкционным материалом являются стали марок HY-80 и HY-100, технология производства и обработки которых наиболее освоена.

Также применяется стеклопластик, обладающий меньшей плотностью по сравнению с металлами, имеет к тому же высокую удельную прочность (в три раза выше, чем у стали, и в два раза, чем у титановых сплавов). К преимуществам стеклопластика относятся также высокая коррозионная стойкость, хорошие антимагнитные свойства и др. Дальнейшая разработка этого материала идет в направлении выяснения причин снижения прочностных характеристик и возникновения усталостных явлений при нахождении его в морской воде под большим давлением. В качестве материала прочного корпуса используют также стекло, которое имеет наибольшую удельную прочность по сравнению с другими конструкционными материалами, применяемыми в аппаратостроении, прекрасно работает на сжатие. Немалое значение имеет и прозрачность этого материала. Известны положительные результаты применения стекла при строительстве аппаратов зарубежными фирмами. Для ВМС США построен аппарат «Дип Вью» со стеклянной передней полусферой прочного корпуса. В 1975 г. построен аппарат «Джонсон Си Линк II» (США) с носовым сферическим прочным корпусом из акрила. В 1977 г. западногерманской фирмой «Брукер физик» построен аппарат «Мермэйд IV» с носовой прозрачной полусферой из акрилового стекла. Существенное преимущество этих аппаратов перед конструкциями из непрозрачных материалов — отличные условия для визуального наблюдения экипажем окружающей обстановки. Однако стекло как материал для прочных корпусов обладает все же недостаточно высокими ударной вязкостью и прочностью на изгиб, что существенно сказывается на работоспособности при потере устойчивости. Кроме того, изготовление из стекла конструкционных деталей — достаточно сложный технологический процесс.

Стальной корпус может состоять из нескольких сфер или колец, соединенных цилиндрическими переходами (рисунок 1.3). Чаще всего сжимаемые корпусные элементы изготавливаются из листовых элементов в виде полос



а)



б)

Рисунок 1.3. Виды элементов прочного корпуса подводного аппарата; а)- разрез прочного корпуса подводного аппарата; б) - схема сборки корпуса подводного аппарата из кольцевых элементов.

или лепестков, соединяемых с помощью сварки [37]. Для уменьшения величины отклонения от сферической или цилиндрической формы корпус подвергают механической обработке на токарном станке.

Сварной шов неоднороден и представляет собой литую дендритную структуру (рисунок 1.4), отвод тепла во время кристаллизации металла шва происходит в основной металл, т.е. кристаллы растут в сторону центра шва, где скапливаются все окислы и легкоплавкие включения, которые могут стать началом для зарождения дефектов. Согласно допускам Международного института сварки, дефекты сварных швов классифицируются на трещины, раковины, поры, твёрдые и газовые включения, окисные плёны, несплавления и непровары, подрезы, искажения внешней формы сварного соединения (смещение свариваемых кромок, изменение толщины сварной детали, скопление металла в месте пересечения швов). Дефекты снижают прочность. Так, по данным [34], наличие подреза может снизить циклическую прочность сварного соединения до 20 раз. Не менее опасно влияние дефектов эксплуатационных, вызванных коррозионными процессами, образованием и ростом микротрещин.

Сварные соединения различного типа отличаются прочностными, технологическими и эксплуатационными свойствами. Используемые при изготовлении глубоководных сварных конструкций стыковые соединения, выполненные стыковыми швами, оптимальны по расходу присадочного металла и удобны для контроля качества сварного шва, нахлесточные и соединения с прерывистыми швами не применяются [102]. Трещины в сварных швах носят усталостный характер и являются одними из самых распространенных дефектов. Достаточно часто трещины от сварного шва распространяются на основной металл.

В прочном корпусе аппарата всегда имеется ряд вырезов и отверстий различных форм и размеров. К ним относятся люки для экипажа, грузовые люки, иллюминаторы, отверстия для электрокабелей и трубопроводов,

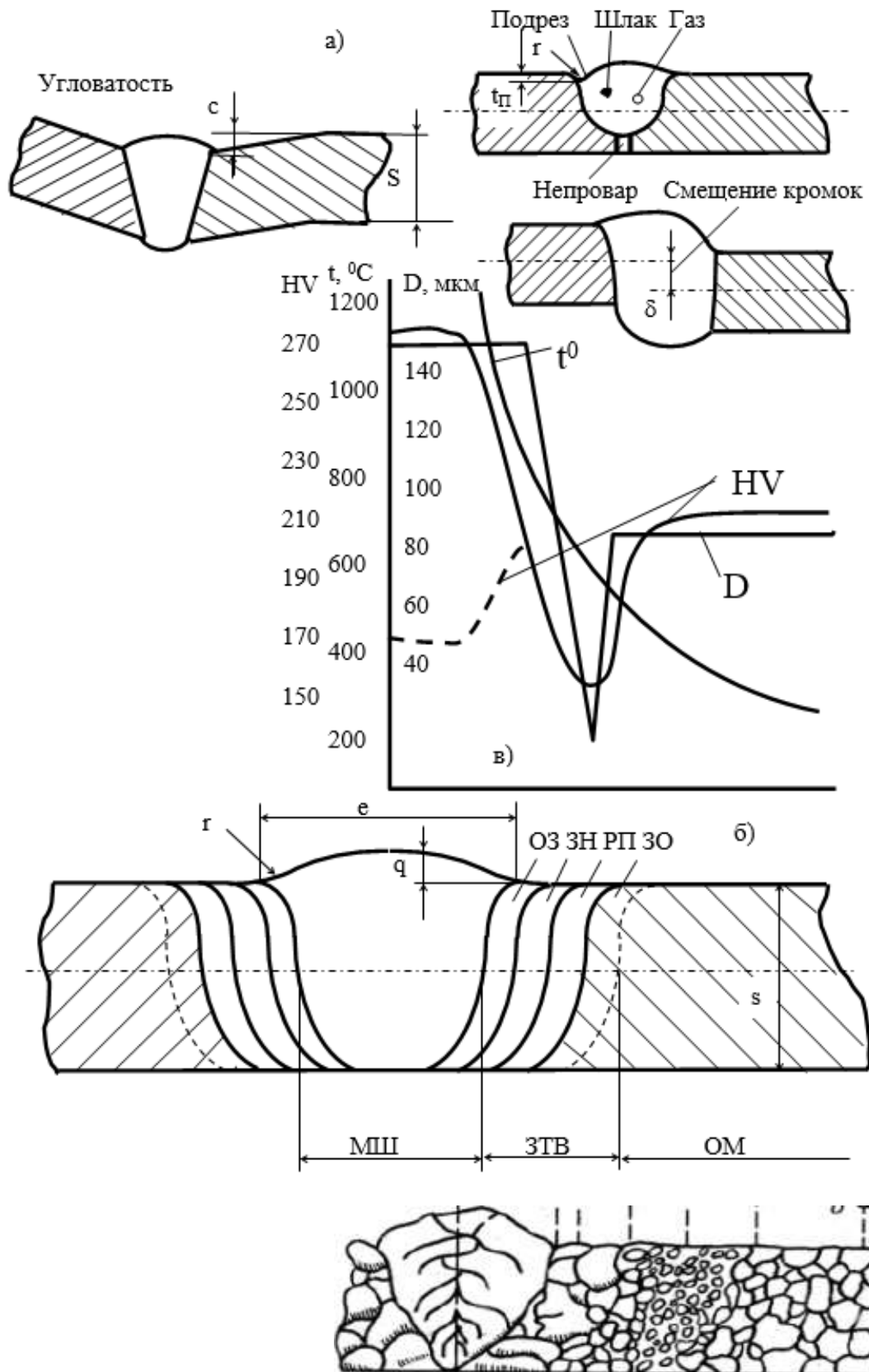


Рисунок 1.4. Структура сварных швов: дефекты (а), характерная неоднородность микроструктуры зон (б) и распределение твёрдости HV по зонам (в)

гидравлических и пневматических устройств. Повреждение этих элементов может привести к таким же критическим последствиям, как и повреждение основных конструкций прочного корпуса.

Основным критерием работоспособности прочного корпуса является прочность-способность сопротивляться разрушению. Однако из-за возможности потери устойчивости удовлетворение критериям прочности по напряжениям сжатия не гарантирует прочный корпус от разрушения. Вследствие потери устойчивости и появления вмятин и выпучин в обшивке и шпангоутах возникают дополнительные напряжения от изгиба, существенно снижающие несущую способность и ресурс оболочки. Концентрация напряжений от гибки и сварки, коррозии, волновых вибрации, переменность знака напряжений, возникающая из-за отклонения от проектируемой формы при погружении и поднятии сооружения, также могут привести к потере работоспособности элементов на глубинах, которые значительно меньше предельной. Анализ видов отказов глубоководных сооружений показал, что при относительно небольшой глубине их эксплуатации работоспособность определяется устойчивостью конструкций, при существенной глубине - прочностью. Поэтому при проектировании, изготовлении, эксплуатации и контроле состояния прочного корпуса аппарата следует тщательно учитывать влияние отклонений от точной геометрии формы, концентрацию напряжений в районе вырезов и усиленных шпангоутов, герметичность уплотнений вводов.

Наибольшую опасность для глубоководных трубопроводов и аппаратов в процессе их строительства и эксплуатации представляет возможность разрушения в виде локального смятия, заключающегося в потере устойчивости сечения трубопровода под действием сжимающего наружного гидростатического давления, изгиба и продольного усилия. Существует опасность лавинного смятия, т.е. в распространении волны возникшего локального смятия по всей длине глубоководного участка. Количество отказов подвод-

ных переходов нефте- и газопроводов в расчете на мерную длину трубопровода больше частоты отказов магистральных нефте- и газопроводов в 1,3 раза. В связи с повышенными экологическими рисками к безопасности и надежности подводных переходов трубопроводов предъявляются повышенные требования.

Основными показателями работоспособности глубоководных сооружений являются глубина и количество циклов их «погружения—всплытия». Различают рабочую, расчётную и предельную глубину, допустимое количество циклов погружения, которое связано с глубиной и зависит от назначения глубоководного сооружения. По мнению иностранных специалистов [179], прочный корпус подводных лодок необходимо рассчитывать на глубину погружения и выносливость с числом циклов «погружения—всплытия», равным 10000—30000. Производится также проверка динамической равнопрочности элементов прочного корпуса подводной лодки или уточнение размеров отдельных корпусных конструкций в случае воздействия на лодку стандартного подводного взрыва.

Для определения допустимых глубин погружения оболочковых элементов конструкций подводного сооружения используется безмоментная модель напряжённого состояния. Напряжённое состояние оболочки характеризуется при этом величинами окружного (тангенциального) σ_θ и меридианного σ_m нормальных напряжений, направленных по касательной к окружности и меридиану оболочки радиусами ρ_θ и ρ_m соответственно. Между указанными параметрами, а также величиной внешнего давления P и толщиной S_c оболочки существует вытекающее из условия равновесия элемента оболочки соотношение, названное уравнением Лапласа:

$$\sigma_\theta / \rho_\theta + \sigma_m / \rho_m = \frac{P}{S_c} \quad .$$

Нормальные напряжения σ_θ и σ_m действуют в площадках элементарного кубика, где отсутствуют касательные напряжения, поэтому являются главными. Третье нормальное напряжение, направленное по нормали к поверхности оболочки, на внутренней поверхности равно давлению P . Однако $P \ll \sigma_\theta, \sigma_m$, поэтому третьим нормальным напряжением пренебрегают, считая, что материал оболочки находится в плоском напряжённом состоянии с главными напряжениями

$$\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_m, \sigma_3 = 0$$

В частности, для цилиндрических оболочек, имеем $\rho_\theta = R$; $\rho_m = \infty$, из уравнения Лапласа $\sigma_\theta = PR / S_c$, из условия равновесия $\sigma_m \cdot S_c \cdot 2\pi R = P\pi R^2$, $\sigma_m = PR/2S_c$, или $\sigma_\theta = 2\sigma_m$. Для сферической оболочки $\rho_\theta = \rho_m = R$, $\sigma_m = \sigma_\theta = PR/2S_c$. Из этих формул и условия не превышения напряжениями допускаемой величины рассчитывается толщина корпуса. Проверка найденных значений на прочность сферических оболочек производится по формуле:

$$\sigma = \frac{PR}{2S_c} \leq [\sigma]$$

где $[\sigma]$ -допускаемые напряжения. Из данного условия прочности вытекает формула определения максимальной рабочей глубины погружения

- для корпусов цилиндрической формы

$$h_{\text{раб}} \leq 100[\sigma] S_c / R, \text{ м,}$$

- для корпусов сферической формы,

$$h_{\text{раб}} \leq 200[\sigma] S_c / R, \text{ м}$$

Допускаемые напряжения $[\sigma]$ назначаются в долях от предела текучести материала прочного корпуса. Коэффициент запаса n прочности, равный отношению значений предела текучести и допустимых напряжений, для первых подводных лодок принимался равным 2, с развитием методов расчёта прочности был снижен до величины 1,4...1,5. В настоящий момент его

значение устанавливается по Нормам, приведенными в Морском Регистре Судоходства [102]:

$$\begin{aligned} n &= 2,3 \text{ при } h_{\text{раб}} \leq 150 \text{ м;} \\ n &= 1,5 \dots 2 \text{ при } 150 < h_{\text{раб}} < 350 \text{ м;} \\ n &= 1,2 \dots 1,4 \text{ при } h_{\text{раб}} \geq 350 \text{ м} \end{aligned}$$

В иностранной литературе отношение расчетной глубины погружения к рабочей называется коэффициентом безопасности. Коэффициент безопасности компенсирует возможные неточности при сложных расчетах и ряд принятых допущений. Зарубежные специалисты считают, что коэффициент безопасности следует выбирать таким, чтобы в случае провала в глубину на полной скорости лодка не могла бы превысить расчетную глубину погружения. При проектировании современных боевых подводных лодок американские специалисты считают возможным принимать коэффициент безопасности в пределах 1,5—2,0. Американские экспериментальные подводные лодки рассчитаны на рабочую глубину погружения 600—960 м, а в перспективном проектировании подводные лодки рассчитываются на рабочие глубины, превышающие 4500 м. Результаты проектных расчётов корректируются с учётом технологических факторов.

1.2. Анализ методов контроля состояния и повышения прочностной надёжности элементов конструкций глубоководных сооружений.

Обеспечение надёжности глубоководных аппаратов начинается на этапе проектирования. Повышение точности проектных расчётов обеспечивается увеличением количеством расчётных итераций и входящих в расчёт критериев работоспособности, совершенствованием программных средств расчёта напряжённо-деформированного состояния. Выполнение предварительных проектных расчётов производится по установленным «Правилам

выполнения расчётов статической прочности», обоснованным значениям коэффициентов запаса прочности и допускаемых напряжений [102].

Расчет производится тремя приближениями. При первом приближении используется формула для идеальной оболочки без шпангоутов. Принимается допущение, что обшивка оболочки глубоководного аппарата находится в условиях безмоментного напряженного состояния, а единственным внутренним силовым фактором, возникающим в сечениях осесимметричной оболочки, является нормальное усилие. Во втором приближении учитывается влияние шпангоутов на прочность и устойчивость оболочки глубоководного аппарата, но пренебрегается местным изгибом обшивки у шпангоутов и поперечных переборок. Расчет элементов прочного в третьем приближении производится с учетом отклонений от проектных параметров, местного изгиба обшивки у шпангоутов и разгружающего влияния поперечных переборок на устойчивость шпангоутов.

Проверка на устойчивость производится по формуле:

$$P \leq \frac{\eta_c P'_c}{n_y}$$

где n_y - коэффициент запаса по устойчивости, P'_c - теоретическое критическое давление.

$$P'_c = 1,21E \left(\frac{S_c}{R} \right)^2$$

где E - модуль нормальной упругости, η_c - поправочный коэффициент, рассчитываемый по форме.

$$\eta_c = \frac{\eta_{hc}}{\sqrt{1 + \left[(1 + \bar{f}_c) \frac{1}{1 + (2,8 + f_c S_c^{-1}) (f_c S_c^{-1})^{2/3}} \frac{P'_c R}{2 S_c \sigma_T} \right]^2}}$$

где $\bar{f}_c$ - величина наибольшего отклонения от правильной формы (рисунок 1.5 г), σ_T - предел текучести. Отсюда необходимая толщина сферической оболочки

$$S_c \geq \frac{\eta_c PR(1 + \bar{f}_c)}{(2\sqrt{2}\sigma_T)}$$

Детальный анализ напряженно деформированного состояния ПК, расчёты на прочность и устойчивость производится с помощью программной системы ANSYS (рисунок 1.5.а, б), которая позволяет учесть такие факторы, как влияние местных подкреплений в виде фундаментов, палуб настилов, которые не только не увеличивают устойчивость обшивки прочного корпуса, а в некоторых случаях могут понижать её; отступления от идеальной круговой формы корпуса; разброс свойств материала в пределах площади листа и по его толщине; коррозионный износ корпуса в процессе эксплуатации глубоководного аппарата. Результаты расчётов сравниваются с требованиями, приведенными в Морском Регистре Судоходства [102].

Изготовленная по результатам проектирования глубоководная конструкция отличается от проектной расхождениями не только внешних макрогеометрических параметрах, но и по параметрам внутренней структуры. Большинство дефектов скрыты и сложны для выявления. Для контроля дефектности и проверки прочности элементов проводят анализ напряжённого состояния, используют неразрушающие методы, в результате которых определяется размер дефекта и место его расположения (рисунок 1.5 в, д). Применение того или иного метода контроля устанавливается проектантом в "Ведомости контроля качества сварных соединений", разрабатываемой в составе проекта подводного аппарата. Неразрушающий контроль элементов глубоководных аппаратов содержит обязательное проведение рентгено- и ультразвуковой дефектоскопии их сварных соединений, которые позволяют выявить раковины и другие дефекты (рисунок 1.5 в). Применяют также капил-

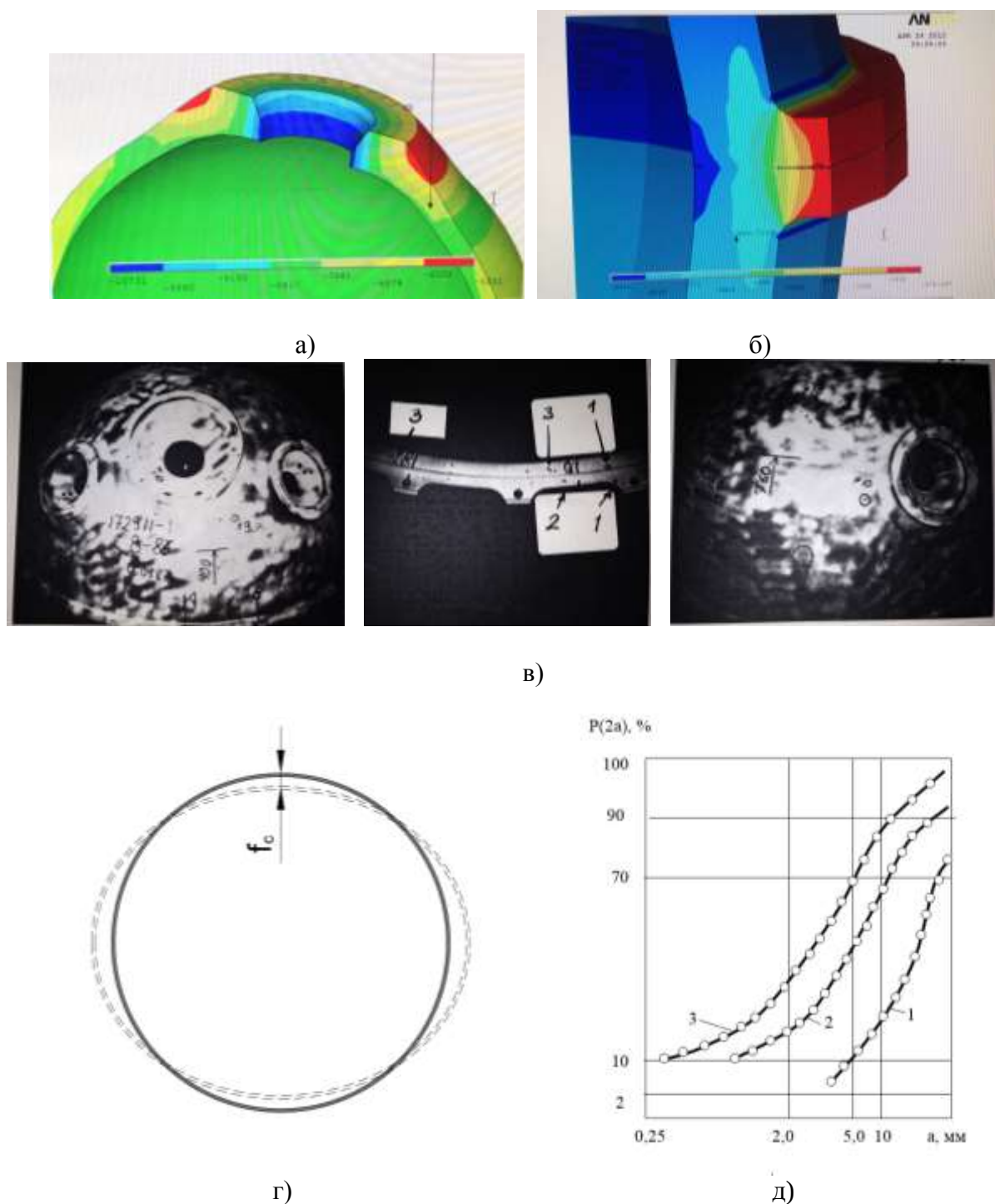


Рисунок 1.5. Методы контроля состояния глубоководных аппаратов: примеры расчёта напряжённого состояния программой ANSYS в районах выреза под входной люк (а) и фланцевого соединения оболочки (б); в)- снимки рентгеновского контроля; г)- контроль величины наибольшего отклонения от правильной формы д)- характеристические кривые чувствительности обнаружения дефектов методами неразрушающего контроля 1- рентгеновский метод; 2- применение окрашивающих жидкостей; 3- ультразвуковой импульсный метод. а- характерный размер (полудлина) дефекта; $P(2a)$ - вероятность обнаружения дефекта (по данным [129]).

лярный, послойный контроль, контроль методом акустической эмиссии, в результате которых определяется размер дефекта и место его расположения, способность корпуса выдержать приложение испытательного давления. Сравнение чувствительности методов к дефектам (рисунок 1.5, д) демонстрирует предпочтительность акустических методов контроля. Поскольку сплошной контроль элементов всеми методами выполнить удастся редко (из-за больших поверхностей элементов), применяют выборочный контроль и оценку поврежденности по наибольшим размерам выявленных дефектов с применением статистических методов [116].

Сложной задачей является также контроль подводных переходов нефте- и газопроводов с целью определения их технического состояния. Водолазное обследование очень дорого и трудоемко. Не всегда возможно получить доступ к трубопроводу для контактной диагностики, особенно уложенному в траншею. Для внутритрубной диагностики необходимо иметь камеры приема-запуска на берегах водной преграды, но большинство подводных переходов (за исключением крупных водоемов) ими не оборудовано. Поэтому разработка доступных и информативных методов контроля подводных переходов нефте- и газопроводов является важной задачей, а неразрушающий контроль и диагностика состояния корпусных элементов подводных трубопроводов является обязательным этапом в обеспечении их надёжности.

Контроль радиационным излучением, как и ультразвуковой контроль способны определить размер дефекта и место его расположения, но не дают представления о степени опасности дефекта, определяющую его надёжность, что не согласуется с задачей обеспечения надёжности. Поэтому окончательная оценка работоспособности сложно нагруженных элементов глубоководных сооружений основывается на результатах проверочных гидравлических сжимающих испытаний [37, 102, 104], заключающихся в создании в замкнутом объеме избыточного давления жидкости, превышающего рабочее давление, действующее во время эксплуатации на прочный корпус. Большой

объём исследований в области прочностных испытаний и обеспечения прочностной надёжности глубоководных аппаратов выполнен в ЦНИИ А.Н.Крылова, в публикациях сотрудников которого отмечается приоритетность прочности в ряду критериев работоспособности и свойств, характеризующих безопасность глубоководных сооружений. Не менее важно совместить требования прочности, надёжности и ресурса с минимальными весом и трудозатратами на постройку объекта. К этому можно добавить требования к ремонтпригодности, ограничения габаритных размеров элементов конструкций, влияние на прочность коррозионных и других факторов. Для проведения прочностных испытаний в приближенных к реальным условиям погружения прочных корпусов подводной техники и забортного оборудования на предельные глубины Мирового океана в целях исследования их прочности и надёжности, а также сертификации испытываемых объектов, используется комплекс наземных гидробарических стендов ДК (рисунок 1.6). Однако, ввиду трудоёмкости их осуществления, испытания внешним давлением заменяются на растягивающие внутренним давлением, что создаёт неадекватное рабочему напряжённому состоянию и приводит к ошибкам контроля.

Таким образом, мероприятия по повышению надёжности, повышению безопасности эксплуатации и снижению степени опасности разрушения элементов глубоководных конструкций можно разделить на проектные (выбор более прочного материала, увеличение размеров, снижение допустимых нагрузок, укрепление соединений, приводящие к повышению запаса прочности и разницы $\Delta_{\text{ср}}$ усреднённых значений параметров состояния и внешнего воздействия на объект контроля- рисунок 1. 7), и технологические (совершенствование сварочных технологий, сортировка по результатам неразрушающего контроля качества, улучшение условий эксплуатации металлоконструкций, назначение своевременного ремонта или других мероприятий, приводящие к снижению рассеяния $\Delta_{\text{действ}}$, $\Delta_{\text{доп}}$ параметров состояния и

внешнего воздействия). Оба вида мероприятий связаны с неразрушающим контролем.

Наиболее эффективные направления совершенствования методов и средств неразрушающего контроля связаны с интеллектуализацией анализа данных контроля на основе построения моделей различных физических

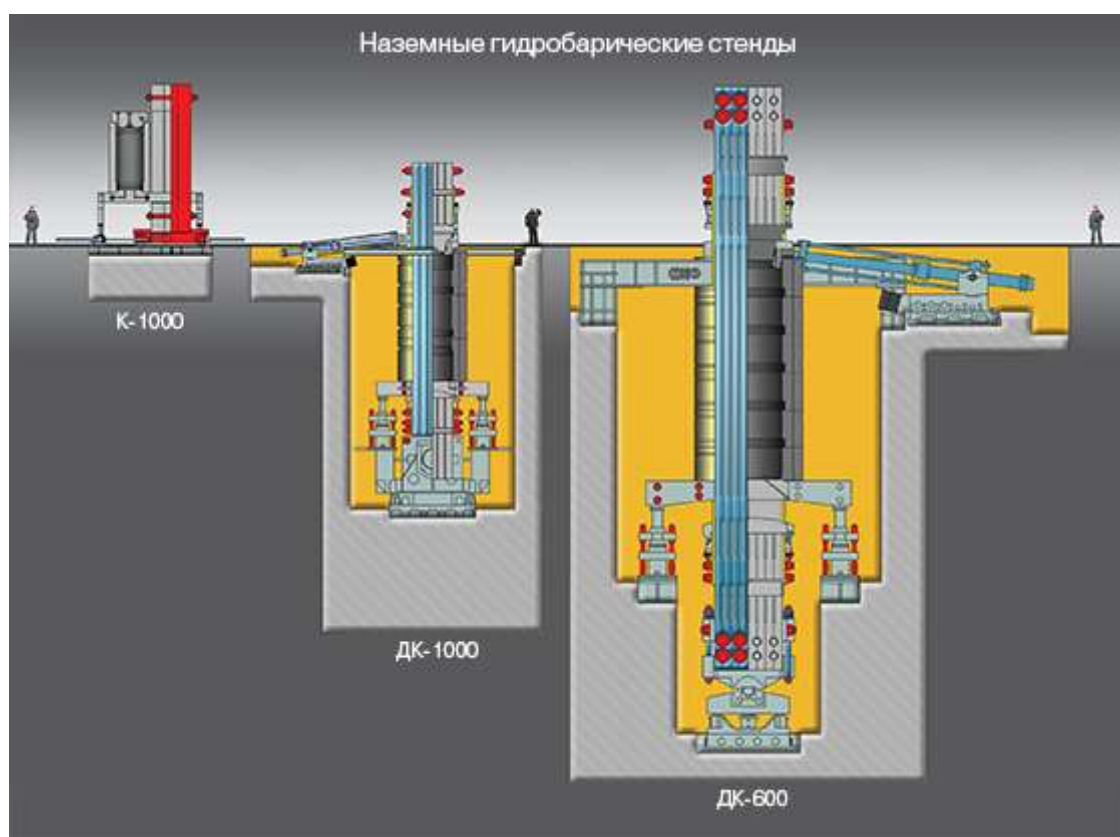


Рисунок 1.6. Комплекс наземных гидробарических стендов ДК.

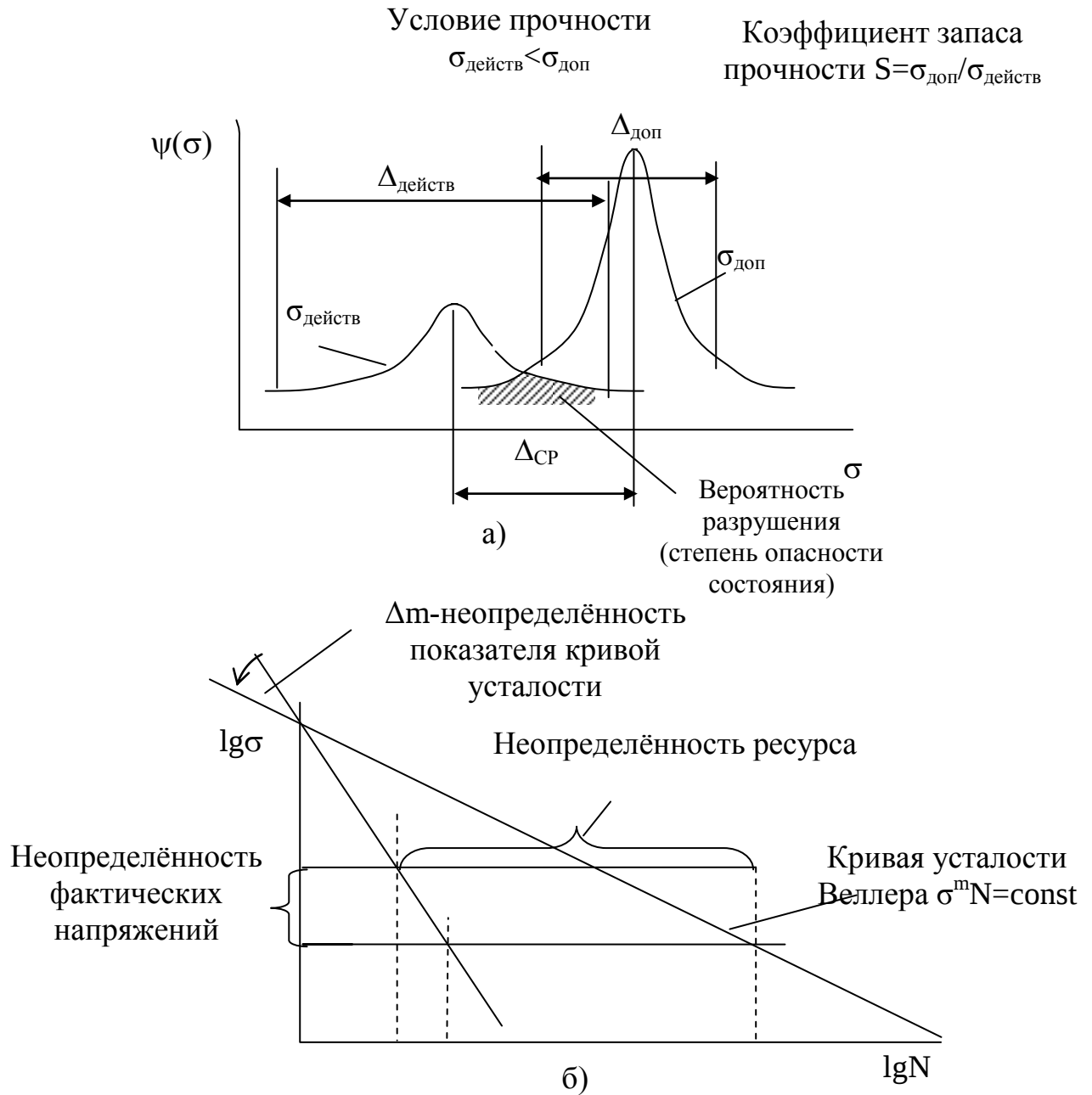


Рисунок 1.7. Вероятностное свойство надёжности (а) и неопределённость ресурса технических объектов

явлений и сопровождающих их процессов, созданием приборов их регистрации и использованием математического, программного обеспечения, компьютеризацией контроля. Перспективным при этом представляется метод акустической эмиссии, который применительно к глубоководным сооружениям хотя и не является новым, однако не получил пока нормативного статуса для контроля прочности. Его активно применяют для контроля качества в процессе выполнения сварного шва (так называемая «горячая» АЭ). Потенциал метода АЭ реализован ещё не полностью, технологии АЭ контроля активно развиваются [94].

1.3. Постановка вопроса, формулировка цели и задач, методология исследований.

Особенность контроля показателей работоспособности глубоководных сооружений связана с многокритериальностью их работоспособности, совместного влияния микро дефектов и отклонений от правильной формы на определяющие работоспособность процессы деформирования и разрушения. Сложность реализации всесторонне сжимающего диагностического нагружения, неопределённость прочностного состояния и интерпретации результатов регистрации сжимаемых материалов и элементов конструкций стандартными методами, делает актуальным необходимость создания новой методики неразрушающего контроля прочности, оценки степени опасности состояния и оценки ресурса на основе локализованной возле опасных дефектов регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе упрощённого диагностического экспресс-нагружения и интерпретации результатов регистрации с использованием универсальных микромеханических закономерностей разрушения и упругого излучения.

Цель работы состояла в обосновании метода неразрушающего контроля прочности и оценки ресурса корпусных элементов глубоководных сооружений на основе оперативного АЭ контроля за процессом их разрушения в

процессе корректного и технологически упрощённого экспресс-нагружения.

В ходе исследований решались следующие задачи:

1. Анализ методов контроля состояния и подходов к оценке работоспособности и обеспечению безопасности эксплуатации элементов глубоководных сооружений, обоснование предпочтительного метода контроля за определяющей работоспособность процессом разрушения;

2. Обоснование принципов оптимизации АЭ контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений на основе формулировки критерия оптимизации и применения обобщённого алгоритма определения представительного АЭ показателя индивидуальных прочностных характеристик;

3. Экспериментальные исследования и анализ данных регистрации сигналов акустической эмиссии сварных корпусных элементов глубоководных сооружений, оценка влияния дестабилизирующих факторов на точность неразрушающего контроля показателей прочности.

4. Разработка метода неразрушающего контроля прочности и ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений.

Проведённые исследования позволили сделать вывод о том, что решение поставленных задач и совершенствование технологий контроля состояния сжимаемых элементов конструкций глубоководных сооружений следует производить посредством совмещения упрощения механических неразрушающих тестовых экспресс-воздействий на объект контроля, сбора первичной АЭ-информации об определяющих состояние конструкций процессах и оптимизации алгоритмов обработки этой информации, повышающей ценность получаемого в ходе контроля диагностического параметра.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

2.1. Явление акустической эмиссии как средство наблюдения за процессом разрушения и принципы оптимизации акустико-эмиссионного контроля прочности

Рассматривая акустическую эмиссию с позиций её практического применения как физическое явление, отражающее происходящие в материалах и определяющие его свойства процессы, АЭ используется как для исследования природной среды, свойств веществ, материалов и изделий, так и для неразрушающего контроля состояния технических объектов. Типичные объекты АЭ контроля- сосуды давления, трубопроводы, металлоконструкции подъёмно-транспортных машин, изделия из композиционных материалов показаны на рисунке 2. 1, а основные определения и правила контроля изложены в руководящих документах [100, 144].

Особенностью метода АЭ является необходимость создания в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ и возможность получения информации не только о появлении микротрещин в материале, но и о кинетике микротрещинообразования. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением или воздействию температурным полем, вид и направление которых определяется конструкцией объекта и условиями его работы. В результате контроля производится определение координат, степени активности источника АЭ и слежение за ним, а обстоятельствами, ограничивающими применение метода АЭ, являются трудности выделения полезных сигналов АЭ из общего их потока и оценки ресурса объекта контроля.

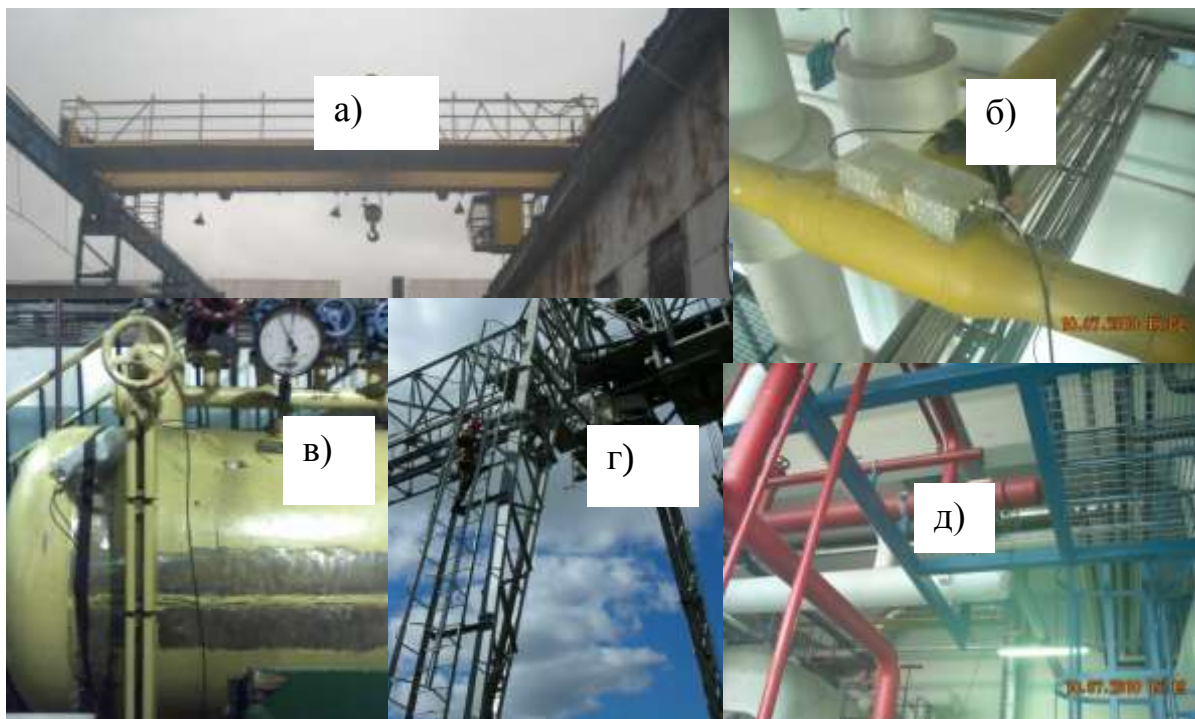


Рисунок 2.1. Наиболее ответственные промышленные объекты, требующие АЭ контроля их состояния а,г- подъёмно-транспортные машины, б, д- трубопроводы, в- сосуда давления

Метод АЭ диагностирования основан на анализе связи параметров АЭ с функциональными и физическими характеристиками объектов контроля, а информативной базой являются представления об определяющих работоспособность и вызывающих АЭ процессах перестройки структуры. Такими процессами являются образование, рост и накопление концентрации микро трещин и пластические деформации. Кроме этого, источниками АЭ могут быть процессы трения и износа, радиационного, химического и электрохимического взаимодействия, утечки жидкости или газа, фазовые превращения. Схема прочностного АЭ-контроля изображена на рисунке 2.2, а применительно к глубоководным аппаратам метод АЭ используется как метод контроля за процессом сварки в процессе изготовления прочного корпуса,

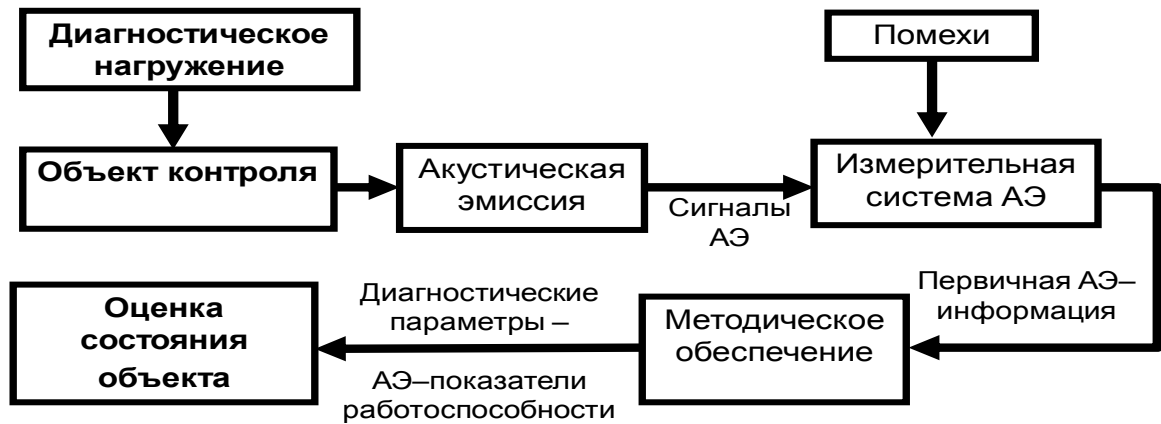


Рисунок 2.2. Схема прочностного АЭ-контроля.

что способствует повышению надежности его сварных соединений и совершенствованию технологии сварки [79].

Основными источниками сигналов АЭ являются процессы разрушения и движения дислокаций во время пластического деформирования, которые протекают в материале одновременно, конкурируют между собой и по-разному связаны с параметрами АЭ, повреждаемостью и прочностью материала [94]. Пластическое деформирование рассматривается в работах [2, 3, 31, 61, 142] состоит в перестройке структуры, при котором происходит как разрыв, так и с восстановление разорванных связей, разрушение связано только с их разрывом. Установлено, что пластические деформации характеризуются потоком элементарных импульсов АЭ, которые могут перекрывать друг друга, образуя непрерывный стохастический процесс, который получил название непрерывной АЭ. Образование и рост трещин, как правило, сопровождается излучением импульсов АЭ, которые достаточно просто различаются. Акустическая эмиссия представляет собой суперпозицию испускаемых актами каждого из перечисленных процессов упругих волн с соответствующими их источникам амплитудно-частотными и временными характеристиками. Факторы, влияющие на параметры АЭ со стороны материала при его нагружении представлены в таблице 2.1 [41-44,78].

Таблица 2. 1. Факторы, влияющие на параметры АЭ

Факторы, повышающие амплитуду АЭ	Факторы, понижающие амплитуду АЭ
Высокая прочность Высокая скорость деформации Анизотропия Неоднородность Увеличение толщины материала Двойникование Разрушение отрывом Низкие температуры Дефекты в материале Мартенситные фазовые превращения Распространение трещины Литая структура Крупное зерно	Низкая прочность Низкая скорость деформации Изотропность Однородность Уменьшение толщины материала - Разрушение сдвигом Высокие температуры Отсутствие дефектов Фазовые превращения диффузионного типа Пластическая деформация скольжением Кованая структура Мелкое зерно

К решению задач АЭ диагностики применяют статистический и физический подходы, в рамках физического подхода доминирует подход механический. В его основе лежит представление о твердом теле как о некоторой сплошной «конструкции», состоящей из частей, связанных силами сцепления. Если на межатомные связи воздействуют силы, превышающие силы сцепления, связи разрываются, тело либо разрушается, либо испытывает необратимую (пластическую) деформацию. На основании этого подхода рядом ученых, начиная с 1960-х годов, создаются математические модели излучения АЭ. В частности, конце 1970-х годов В. И. Ивановым была предложена следующую модель возникновения АЭ: "При нагружении твердого тела постепенно нарастают механические напряжения, в решетке накапливается потенциальная энергия. По достижении напряжениями предельных значений, равных прочности кристаллической решетки, атомные связи разрываются с импульсным выделением накопленной энергии в виде акустического излучения. Амплитуда излученного импульса будет зависеть от величины предварительно запасенной энергии, от распределения ее на образование новой поверхности и преобразование в акустическое излучение". Лексовским А.М. с сотрудниками лаборатории физики прочности

ФТИ им. А. Ф. Иоффе в 2016 г это положение было сформулировано в виде «нового системно-образующего механизма разрушения гетерогенной системы при её деформировании в стеснённых условиях». В процессе мелкодисперсного разрушения на основе акустико-эмиссионных исследований и с помощью растровой электронной микроскопии выявлены этапы с «достаточными» и «подавленными» диссипативными свойствами: «...стадийность структурной эволюции определяется дискретностью её «элементарных» актов и «вынужденным» релаксационным механизмом перераспределения локальных напряжений» [62]. Критичность состояния определяется динамическим соотношением между освобождаемой энергией в дискретном акте структурной перестройки и диссипативными свойствами ближайшего окружения или системы в целом. «...В определённый момент времени величина латентной энергии оказывается достаточной для старта «обострения» процесса, то есть для дискретного структурного перестроения следующего масштабного уровня». Однако конкретная методика определения этого момента по скрытой (латентной) энергии не предлагается, что делает невозможным применения данных выводов для решения практических задач АЭ контроля.

Удачной базой для расшифровки результатов АЭ контроля является микромеханическая модель разрушения. Разрушение представляется двухстадийным процессом [137]. В связи с кратковременностью и завершающим характером второй стадии (5-10 % от общего времени разрушения) прогноз ресурса конструкций, находящихся на этой стадии разрушения может быть рассмотрен, как краткосрочный. Общая классификация подходов к АЭ контролю и диагностированию, эффективность которого определяется обеспечением диагностической ценности (контролепригодности и информативности) диагностических параметров, показана на рисунке 2.3 а, а разделённые с точки зрения двухстадийной модели процесса разрушения методики краткосрочного и долгосрочного АЭ-прогнозирования ресурса различных объектов - на рисунке 2.3 б.

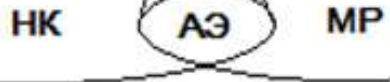
Подходы к обеспечению безопасности методом АЭД

Контролепригодность

Статистический подход



1. Персонал 2. Машина 3. Техника

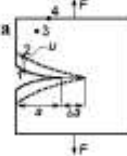


$N, N_{\Sigma}, A_{cp}, A_{\Sigma}, A_{max}, E$ - ПБ 03-593-03

Статистические инварианты
(Трипалин, Буйло, Бигус,
Алёшин, Нефедьев, Савельев,
Петров, Бырин, Попов)

Информативность Механический подход

Модель Периса-Эрдогана
Скорость развития трещины $V = A K_I^m$



Скорость счёта АЭ $N' = A_0 K_I^m$

м-локально-динамический показатель (Иванов-Быков)

Информационно-кинетический подход

Модель микротрещинообразования

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\Theta_{CP}(t)}$$



где $\Theta_{CP} = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma C)/(KT)]$ - формула Жёркова

Микромеханическая модель параметров АЭ Носова

$$\xi(t) = k_{AE} C(t)$$

X_{AE}, Y_{AE}, W_{AE} - концентрационно-кинетические показатели (Носов)

а)



б)

Рисунок 2.3. Классификация подходов к акустико-эмиссионному диагностированию (а) и анализ некоторых методик АЭ-прогнозирования остаточного ресурса (б).

Более перспективной с точки зрения обеспечения безопасности глубоководных сооружений является концепция их контроля, обеспечивающего долгосрочное прогнозирование механического разрушения, которая состоит в определении времени, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин на первой наиболее длительной стадии разрушения. Существуют различные модели первой стадии разрушения конструкционных материалов, учитывающие взаимодействие между процессом накопления повреждений и финальным разрушением [10-15, 52-54, 74-77]. Имеющиеся в образце начальные микродефекты влияют на соотношение и варианты описания стадий разрушения, которое проходит в различных зонах материала, например, композиционного – арматуре, матрице и по границе раздела [86].

Наряду с механическими и микромеханическими представлениями о явлении АЭ, востребованным в настоящее время остаётся существенно автоматизированный статистический подход к решению задач АЭ контроля (рисунок 2.3 а), основанный на спонтанном поиске статистических связей между параметрами АЭ и параметрами состояния объекта контроля. Установлена связь различных инвариантных соотношений характеристик потока сигналов АЭ со стадией разрушения стальных образцов (рисунок 2.3 б). Для оценки стадии деформирования, разрушения, остаточного ресурса или класса источника АЭ используется анализ изменения энергетических и частотных распределений вероятностей (эллипсов рассеяния), среднеквадратические отклонения энергетических показателей сигналов АЭ [1, 18, 21-23, 133, 134]. Статистический подход, опирающийся на хорошую контролепригодность и эффективный при решении задач краткосрочного прогноза, для обеспечения долгосрочных оценок требует дополнительной информации, получаемой из обучающих экспериментов на эталонных образцах, создание которых в условиях структурной неоднородности проблематично. Физический же подход, опирающийся на построение адекватных,

универсальных и информативных физических моделей параметров АЭ (информативность), предполагает необходимость глубокого интеллектуального анализа данных и использование результатов фундаментальных исследований явления АЭ и процесса накопления повреждений, что и предлагается в данной работе.

В рамках решения задачи долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса материалов и конструкций существуют две основные проблемы применения стандартных методик прочностного АЭ контроля:

1. Низкая обучаемость методик статистического подхода вследствие низкой степени универсальности используемых статистических инвариантов и эталонов и, как следствие, низкой информативности применяемых статистических моделей. Обучаемые на «несовершенных» эталонах, методики плохо работают на примерах, не участвующих в обучении.

2. Низкая помехоустойчивость методик в следствии плохой фильтрации регистрируемых сигналов, нестабильности связей и некорректности постановки и решения обратных задач распознавания состояния.

Разработка технологий АЭ контроля прочности должна сводиться к:

- комплексной формулировке эксплуатационных аспектов обеспечения работоспособности промышленных объектов;
- выделению прочности как основного критерия их работоспособности;
- моделированию определяющего прочность и остаточный ресурс процесса накопления повреждений, лимитируемого моментом достижения критической поврежденности;
- обеспечению возможности прогнозирования этого момента на основе корректного наблюдения за процессом накопления повреждений с помощью метода АЭ.

Снижение дестабилизирующего влияния помех, неопределенности в интерпретации результатов регистрации сигналов и связи критериев активности источников АЭ с критериями работоспособности сложно нагруженных

объектов представляется возможным на основе принципов информационной оптимизации АЭ контроля. В качестве критерия оптимизации следует принимать способность к обеспечению долгосрочного прогнозирования показателей ресурса. Количественно эту способность можно характеризовать коэффициентом корреляции значений диагностических параметров АЭ или рассчитываемых через них прочностных характеристик со значениями экспериментально определяемых времен до разрушения или образования трещины, размеров дефектов, разрушающей нагрузки, предела прочности, расчетных значений напряжений или связанной с ними зоны промышленного объекта. Подходы к поиску диагностических параметров АЭ и разработке конкретных алгоритмов АЭ-диагностирования должны быть основаны на последовательном построении различного уровня моделей процессов и явлений, определяющих работоспособность и параметры регистрируемых сигналов.

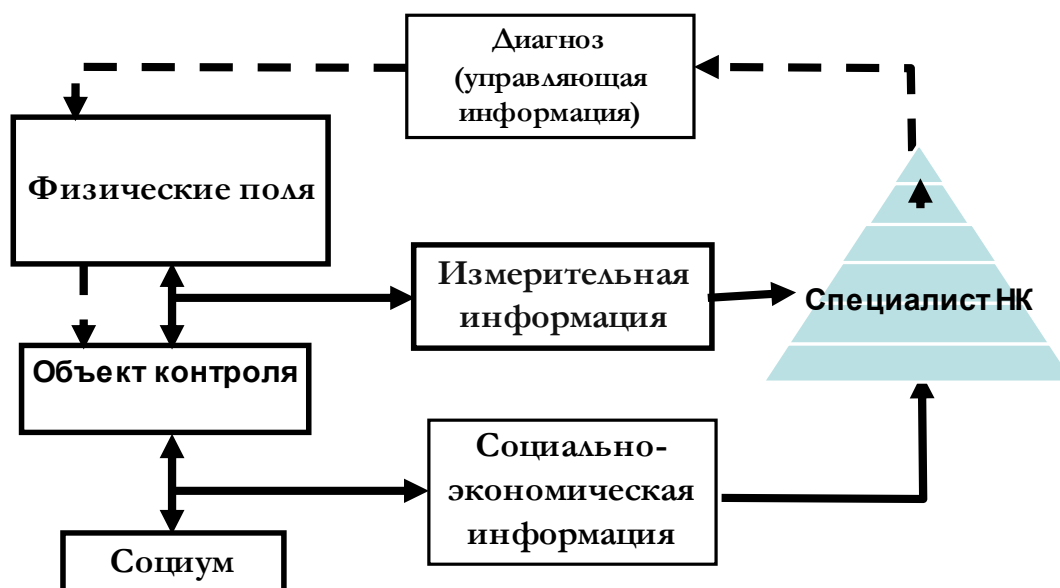
Повышение информативности АЭ контроля следует вести на основе интеллектуального анализа данных посредством высоко информативного моделирования, снижающего неопределённость количественных АЭ выражений контролируемого процесса разрушения. В связи с этим можно сформулировать следующие выводы для решения задачи долгосрочного АЭ прогнозирования ресурса:

1. Статистический подход к АЭ разработке методик оценки ресурса сжимаемых элементов должен быть рассмотрен только как вспомогательный в виду его низкой информативности;
2. Помехоустойчивость должна обеспечиваться физически обоснованной формулировкой понятия помехи, вытекающими из этого методами её устранения и корректностью АЭ контроля.

В основе информативного физического моделирования должны быть положены универсальные физические закономерности с обоснованными константами моделируемого процесса. В качестве таковых выбраны микро-механическая модель АЭ, дискретизация стадии мелкодисперсного

разрушения на различающиеся по прогностическим свойствам этапы неоднородного и однородного разрушения, относительно стабильные параметры модели однородного разрушения и ему соответствующей временной зависимости параметров корректно регистрируемой АЭ.

Таким образом, для совершенствования АЭ контроля выбран информационно-кинетический подход, регламентирующий поэтапный переход от объекта контроля к его адекватной универсальной модели, информационно наполняемой результатами регистрации сигналов АЭ (рисунок 2.4). Решение поставленной задачи основано на последовательном построении адекватных, логически взаимосвязанных и иерархически подчиненных моделей объекта контроля по порядку убывания их информативности с повышением уровня абстрагирования и определения параметров модели. В настоящий момент с этих позиций сформулированы основные принципы оптимизации технологий АЭ диагностирования, касающиеся правил проведения АЭ испытаний, регистрации и обработки первичной АЭ информации, построения моделей определяющего ресурс процесса разрушения, отображающего его явления АЭ и временных зависимостей её параметров. Функциональная модель фокусирует внимание на прогнозирование ресурса объекта контроля и выделение в качестве предмета исследования связанных с ним процесса микро-трещинообразования и временных зависимостей параметров АЭ, вытекающая из неё физическая модель увязывает выделенные функциональные свойства и факторы обобщёнными физическими свойствами и закономерностями. Последующее построение математической модели сводится к количественному описанию выделенных физических закономерностей в виде



а)



б)

Рисунок 2.4. Методология совершенствования технологий АЭ-контроля. а- схема взаимодействия специалиста и объекта неразрушающего контроля; б- информационная «пирамида» специалиста неразрушающего контроля и направляющий оптимизацию контроля алгоритм выработки заключения (управляющей информации).

конкретных математических выражений с универсальными константами, объединяющей метрологические и прочностные факторы. В работах [83-98] сделаны следующие выводы, которые легли в основу разработки алгоритмов прогнозирования механического разрушения:

1. Характеристики прочности, параметры процесса разрушения и АЭ материалов зависят от результата конкуренции одновременно протекающих в материале процессов разрушения и пластического деформирования структурных элементов.

2. Ресурс большинства длительно нагруженных материалов, конструкций и сооружений определяется процессом микротрещинообразования, протекающим в условиях упругого деформирования.

3. Разрушение состоит из двух стадий - мелкодисперсного (рассеянного по объёму объекта либо локально сгруппированного в области дефекта) накопления концентрации микротрещин, и укрупнённого локализованного разрыва сплошности (образования или роста трещины), протекающего упруго либо пластически.

4. Первая стадия состоит из двух этапов с отличающимися кинетическими и диссипативными свойствами: кинетически неоднородного, связанного с разрушением разнопрочных структурных элементов с повышенными диссипативными свойствами, и кинетически однородного микротрещинообразования в виде разрушения равнопрочных элементов с умеренными диссипативными свойствами, достаточными для релаксации напряжений.

5. Акустическая эмиссия упруго деформированных материалов связана, главным образом, с процессом микротрещинообразования. Количество сигналов от пластической деформации перенапряжённых структурных элементов относительно невелико. Для уменьшения их дестабилизирующего влияния на результаты прогнозирования ресурса следует применять частотную и амплитудную фильтрации.

6. Неоднородность прочностного состояния сложно нагруженных объектов связана с неоднородностью поля механических напряжений и со структурной неоднородностью материала шва.

7. У образцов, выполненных без ярко выраженных концентраторов, этап неоднородного разрушения наиболее длителен (до 60% от длительности первой стадии). У образцов с дефектами этап кинетически неоднородного разрушения не превышает 30%. После образования трещины образцы разрушаются однородно, как с концентратором напряжений.

8. Разрушение образцов с концентратором напряжений протекает кинетически однородно. После образования трещины происходит её развитие с разгрузкой напряжённых зон сварного шва и пластической перестройкой структуры материала.

9. Влияние неразвивающейся трещины на процесс разрушения происходит упруго (без длительных сигналов АЭ) и способствует снижению степени неоднородности разрушения.

10. Следствием прочностной неоднородности состояний структурных элементов является снижение при нагружении амплитуды сигналов и невоспроизводимость активности АЭ при повторном нагружении (эффект Кайзера)

11. Латентность АЭ при повторном нагружении конструкций информативна и свидетельствует об отдалённости момента накопления критической концентрации микротрещин вблизи концентратора и об отсутствии в материале соединения опасных дефектов.

12. Предложены диагностические параметры и сформулированы диагностические признаки состояния сложно нагруженных объектов контроля, способные стать базой создания методики оценки работоспособности объектов, функционирующих в условиях неопределённости напряжённо-деформированного состояния.

2.2. Неразрушающий контроль состояния сосудов и кольцевых элементов конструкций, работающих под давлением.

Из всего многообразия элементов сложных технических объектов наиболее неблагоприятно разрушение элементов сосудов, выполняющих роль аппаратов для перевозки людей, технологических аппаратов, резервуаров, корпусов, трубопроводов объектов атомной энергетики, химической, нефте- и газодобывающей, судостроительной промышленности (рисунок 2.5). Наиболее типичными дефектами тонкостенных сварных сосудов различного назначения являются дефекты сварки (62 % от общего числа дефектов и повреждений сосудов), локальные коррозионные повреждения (13%), вмятины монтажного происхождения (11%), задиры металла (6%), смещения кромок (4%), коррозионно-усталостные и усталостные трещины (1%), прижоги. Число дефектов и повреждений возрастает с увеличением срока эксплуатации сосудов. Особенность перечисленных дефектов - в их скрытости как по расположению, так и по степени опасности, которая не устраняется стандартными расчётными методами. Остаточный ресурс резервуаров, работающих в условиях статического нагружения и активных коррозионно-эрозионных процессов, определяют по скорости коррозии, а резервуаров, используемых в условиях малоциклового нагружения, когда основной повреждающий фактор –малоцикловая усталость, устанавливают на основе кривых усталости по Гост 25859-83.

Диагностика промышленных сосудов производится в соответствии с “Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением”, “Методическим указаниям по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России” [85]. Техническое диагностирование сосудов следует проводить после истечения назначенного срока эксплуатации, после аварии или ремонта.

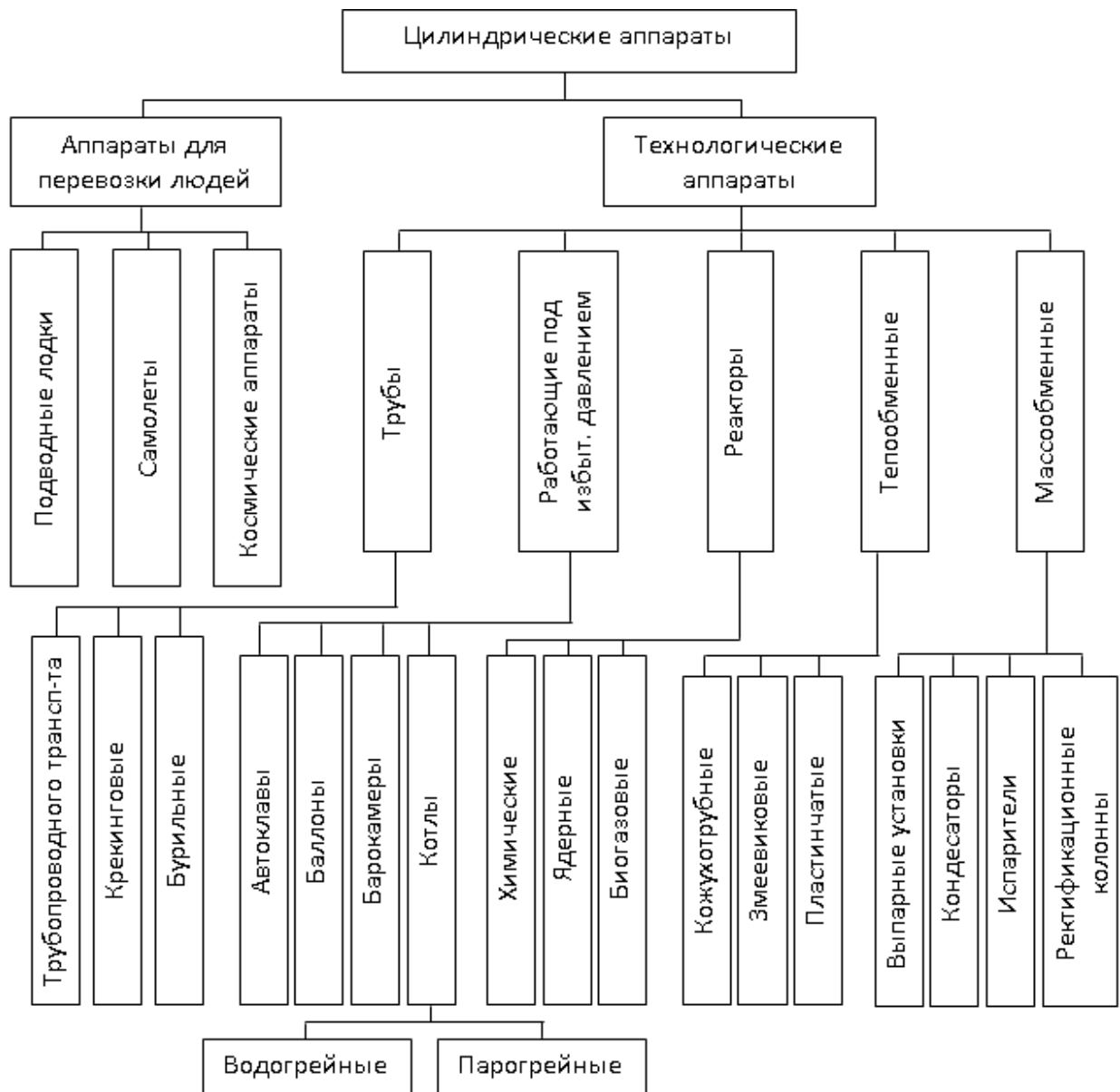


Рисунок 2.5. Классификация сосудов давления

Основными видами неразрушающего контроля сосудов при проведении технического диагностирования являются: ультразвуковой, радиографический, магнитопорошковый, электромагнитный, капиллярный, металлография, акустической эмиссии. Целью неразрушающего контроля является выявление наружных и внутренних дефектов в основном металле, сварном соединении, контроль толщины стенки (толщинометрия). В процедуру контроля входит проведение гидравлических или пневматических испытаний, целью которых является проверка герметичности и прочности сосуда под давлением на завершающей стадии технического диагностирования. Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в процессе его проведения визуально не обнаружено падения давления по манометру, течи в основном металле, резьбовом или сварном соединениях, трещин или признаков разрыва, остаточных деформаций тела сосуда. При проведении пневматических испытаний, необходимость в которых устанавливается разработчиком программы, обязательно применение метода акустической эмиссии. На основании результатов контроля проводят анализ повреждений, параметров технического состояния и (при не удовлетворении требованиям нормативной документации) поверочный расчёт сосуда на статическую, циклическую прочность и трещиностойкость (как правило, по коэффициенту интенсивности напряжений). При этом следует устанавливать механизмы образования и роста обнаруженных дефектов и повреждений, вероятности отказов вследствие развития разрушения. Для уточнения расчётов должны быть применены экспериментальные методы (тензометрия, акустическая эмиссия). Основной характеристикой способности материала сопротивляться хрупкому разрушению является критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , критическая температура хрупкости и предел текучести.

Задача АЭ-диагностики состояния сосудов давления, также, как и других объектов, решается различными подходами (рисунок 2.3). Регистрируя суммарное число импульсов АЭ в процессе диагностического нагру-

жения, оценивают степень опасности трещины и запас долговечности сосуда [41-44].

Рекомендуемые руководящими документами в настоящее время критерии АЭ контроля не всегда однозначно связаны с ресурсом сосуда давления, что следует отнести к их недостаткам. Ещё более неопределённой является связь параметров АЭ с характеристиками прочности сосудов и элементов конструкций, сжимаемых внешним давлением. Так, если регистрируемая при растяжении изделий из композиционных материалов временная зависимость числа импульсов либо их суммарной амплитуды АЭ имеет монотонно возрастающий характер (рисунок 2.6, а, б), то при осесимметричном сжатии бездефектных стеклопластиковых колец зарегистрирована более сложная немонотонная кинетика сигналов АЭ (рисунок 2.6, в). Появление дефекта снижало степень немонотонности временной зависимости параметров АЭ сжимаемого кольца. Данные результаты подтверждают сделанные ранее выводы о существенной особенности временных зависимостей параметров АЭ сжимаемых кольцевых конструкций, необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований для обоснования возможности применения или модернизации разработанных ранее методических принципов контроля и прогнозирования в программе прочностных исследований.

2.3. Микромеханическая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии и физические основы долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса.

Согласно изложенной методологии, оценка ресурса конструкций сводится к долгосрочному прогнозированию времени до наступления отказа на основе экстраполяции временных зависимостей значений параметров технического состояния объекта до их критической величины и основана на анализе результатов определённым образом проведённого неразрушающего

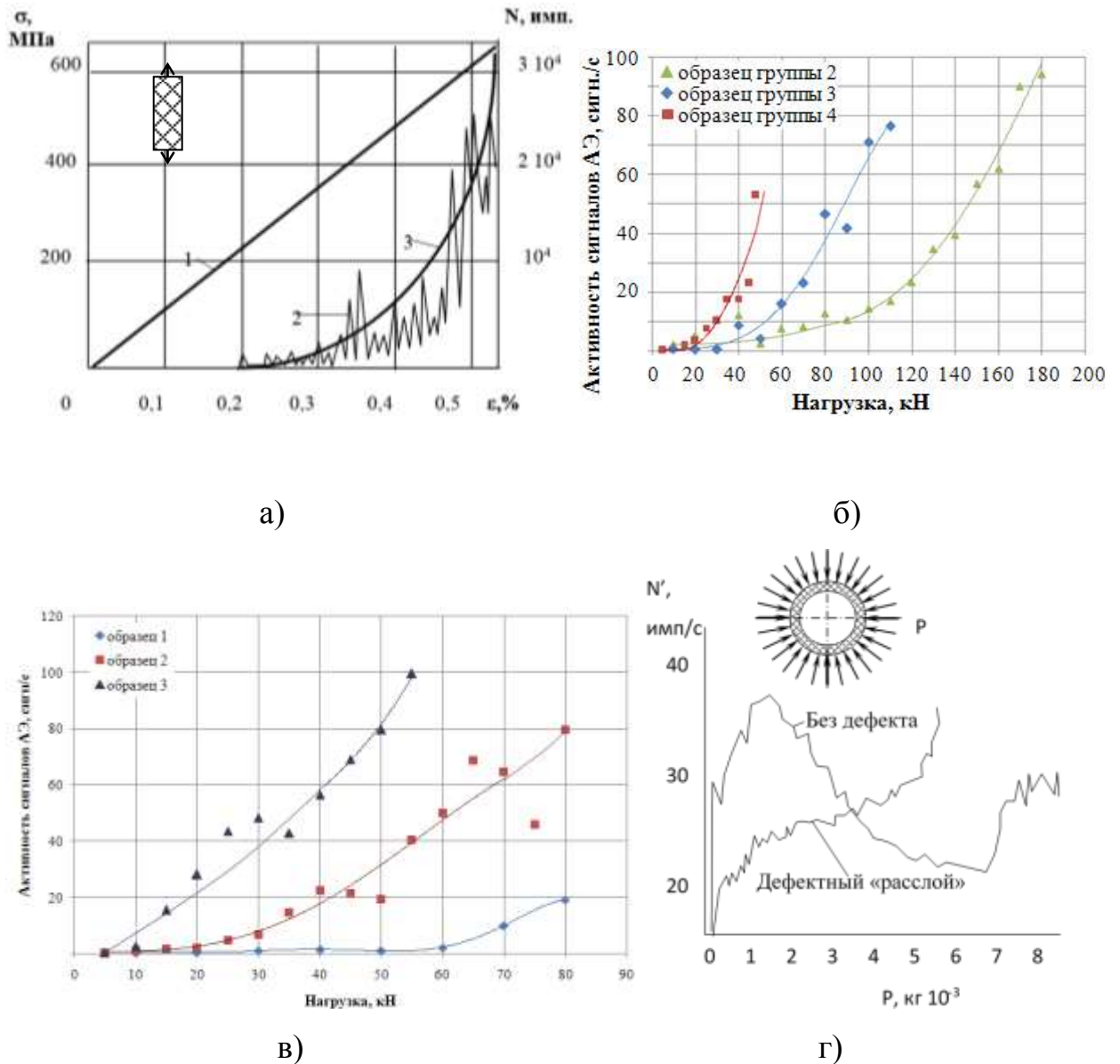


Рисунок 2.6. Влияние вида нагружения на характер акустической эмиссии: а,б-акустическая эмиссия при растяжении углепластика 1-зависимость значений напряжений σ и относительной деформации ϵ ; 2-текущая запись числа импульсов АЭ; 3-интегральная кривая АЭ, образцы групп 2,3,4 с разной структурой и прочностью гр.2 наиболее прочные, гр.3-в 2 раза меньшую разрушающую нагрузку, гр.4 имели в 3,5 раз меньшую нагрузку;-в-зависимость активности сигналов АЭ от нагрузки при испытании образцов из стеклопластика 1- бездефектный образец, 2-образец с пропилом 20 мм, 3-образец с пропилом 25 мм [143]; г- активность АЭ сжимаемых колец из стеклопластика [35].

акустико-эмиссионного контроля и оценке параметров модели приводящего к отказу процесса. Для прогнозирования остаточного ресурса технических объектов используются различные варианты линейных, степенных, логарифмических, экспоненциальных и других видов временных зависимостей параметра состояния, применение которых не всегда обосновано. На наш взгляд наиболее обосновано прочностное состояние связывать со скоростью накопления повреждений, которая задаётся средним временем θ до разрушения структурных элементов, связанным с величиной растягивающего элемент напряжения σ с помощью формулы Журкова [83-98, 111,137, 184-196]

$$\theta(t) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(KT)] = \tau_0 \exp[U_0/(KT) - \omega(t)], \quad (2.1)$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$ с - период атомных колебаний, U_0 - энергия сублимации (энергия отрыва атома при переходе тела из твёрдого состояния в газообразное), γ -структурно-чувствительный параметр, K - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, $\omega = \gamma\sigma/(KT)$. Твёрдое тело представляется в виде связанных между собой структурных единиц (микроэлементов), удерживаемых друг возле друга энергией U_0 . При приложении внешней нагрузки и создании напряжений σ эта энергия понижается на величину $\gamma\sigma$.

Концентрация C микротрещин (разрушенных структурных элементов - атомных или молекулярных связей, волокон, кристаллов, зёрен, ячеек, микрофибрилл и др.) на первой стадии мелкодисперсного разрушения изменяется во времени t по закону

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\Theta_{CP}(t)},$$

где C_0 -начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения, θ_{CP} - среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова, при начальном условии $C(0)=0$.

Из-за неоднородности температурного поля, структурного и напряжённого состояния материала твёрдого тела, среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае не одинаковы. Следствием неоднородности механического состояния конструкционных материалов является масштабный эффект прочности - зависимость её характеристик от размеров образца. Чем грубее структура материала, тем сильнее проявляется масштабный эффект. Неоднородность структуры носит стохастический характер и связана с разбросом механических свойств структурных элементов. Первоочередное разрушение и выход из процесса наименее долговечных элементов приводит к повышению со временем среднего времени $\theta_{\text{ср}}$ разрушения структурного элемента. С учётом этого обстоятельства, моделирующего прочностную неоднородность материала, общим решением уравнения скорости роста концентрации разрушенных структурных элементов (микротрещин) является выражение

$$C(t) = C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \theta_{\text{ср}}(\omega(t')) \right] \right\} d\omega ,$$

где $\Psi(\omega)$ - функция плотности распределения значений величины $\omega = \gamma\sigma/KT$ по структурным элементам, μ -нижняя граница изменения этой величины; $\Delta\omega$ - доверительный интервал разброса значений ω по структурным элементам. Вид функции $\Psi(\omega)$ определяется распределениями значений напряжений σ и коэффициента γ в материале (рисунок 2.7), которые связаны с распределением концентраторов напряжений по размерам.

Распределение коэффициента γ описывается ограниченными функциями. Ограничения распределения отражают физическую природу минимально- и максимально возможной долговечности структурных элементов, а значения параметров распределения определяют степень неоднородности механического состояния материала объекта. Характерно, что примерно 80 % связей от общего числа практически не несёт перегрузок, а около 20 %

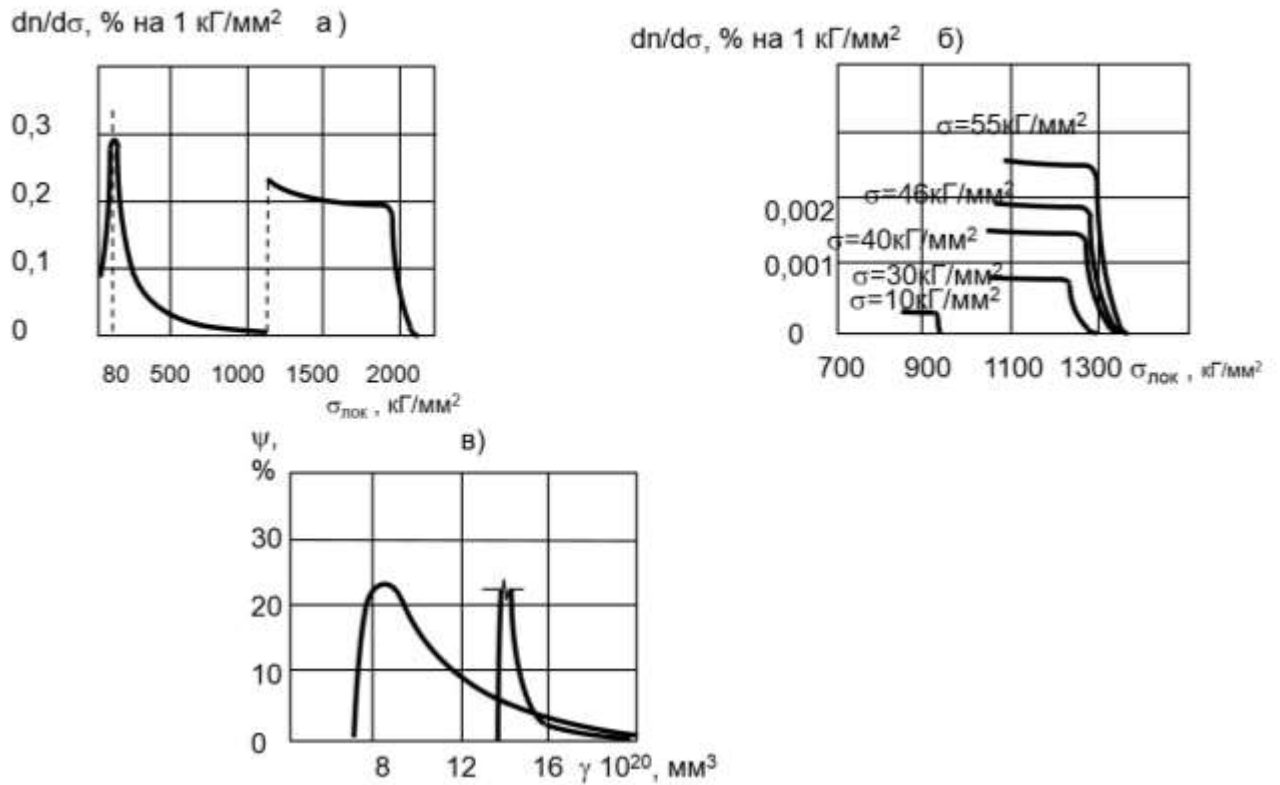


Рисунок 2.7. Распределения числа межатомных связей по локальным напряжениям, найденные методом инфракрасной спектроскопии [137].

а) Полное распределение в образце капрона, нагруженном растягивающим напряжением 84 кГ/мм^2 ; б) Распределение связей по локальным напряжениям образца полипропилена в области наибольших перегрузок; в) плотности распределения связей по γ в полимерных материалах [132].

оказываются в той или иной степени перегруженными. В некоторый момент времени $t=\tau^*$ концентрация C достигает критической величины C^* , при которой разрушение каждого структурного элемента уже существенно влияет на напряжённое состояние вокруг соседнего уже ранее разрушенного. Это может привести к объединению микротрещин и переходу разрушения на вторую стадию. Объединение микротрещин может привести к образованию кластера - области разрушенных связей, размеры которой связаны с размерами объединяемых структурных элементов. Если размеры кластера не являются опасными, то дальнейшее разрушение переходит на следующий,

более крупномасштабный этап дисперсного разрушения в виде накопления концентрации кластеров данного размера [58]. Этот этап разрушения описывается теми же закономерностями и также лимитируется моментом накопления критической концентрации областей разрушений с размером рассматриваемого кластера. Этапы дисперсного разрушения сменяют друг друга до тех пор, пока размер очередного кластера не станет опасным, при котором дальнейшее разрушение становится локализованным и происходит в виде прорастания опасного кластера (трещины) в поле создаваемых им перенапряжений вплоть до полного разделения тела на части. Характерно, что соотношение критической C^* и начальной концентраций C_0 структурных элементов в материале не зависит от вида материала или размеров твёрдого тела и находится в пределах $10^{-1} \div 10^{-2}$. Установлено также, что стадия прорастания трещины является неоднородной. Трещина растёт “скачками”, в период между которыми в области непосредственного влияния трещины происходит мелкодисперсное накопление концентрации микротрещин по описанным законам первой стадии децентрализованного разрушения.

Разделение процесса разрушения на стадии и их математическое описание может быть представлено следующим образом:

1. Стадия мелкодисперсного (делокализованного либо локально сгруппированного в области концентратора напряжений) разрушения, протекающая в виде роста концентрации микротрещин в материале (разрушенных структурных микроэлементов);

В условиях неоднородности механического состояния структурных элементов временная зависимость концентрации микротрещин описывается уравнением

$$C(t) = C_0 \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \Psi(\Theta) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \theta(t') \right] \right\} d\theta \quad ,$$

где $\Psi(\theta)$ - функция плотности распределения значений долговечности по структурным элементам, $\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$ - крайние значения долговечности.

Стадия заканчивается и переходит на новую в момент t^* накопления критической концентрации C^* микротрещин, когда

$$C(t^*)=C^*$$

2.Стадия укрупненного разрушения в виде локализованного образования (роста) трещины, протекающего упруго либо пластически. Описывается методами механики разрушения

$$V= A(K)^n,$$

где V -скорость роста трещины, K -коэффициент интенсивности напряжений, A , n -характеристики сопротивления развития усталостной трещины в материале.

Рассматривая разрушение как процесс накопления повреждений, установленные закономерности распространяются на сложные виды нагружения (циклического, равномерного, термонагружения и т. д.). Явление циклической усталости в кинетической концепции прочности выступает в качестве частного случая разрушения [111]. Силовые зависимости долговечности образцов от напряжений имеют в полулогарифмических координатах вид прямой линии, отсекающей на оси $\lg t$ значение « $0,43U_0/KT-13$ », которое для материала относительно стабильно, что является обоснованием возможности его определения на образцах материала (рисунок 2.8 а). Снижение циклической долговечности относительно статической объясняется [111] переходом части энергии внешних сил (пропорциональной площади «гистерезисной» петли, получающейся за цикл нагрузка-разгрузка в координатах напряжения - относительная деформация σ - ε) во внутреннюю энергию тела и нагревом образцов. Причиной излома зависимости $\lg t$ (σ) (рисунок 2.8 б) при больших напряжениях является структурная нестабильность (пластическое деформирование) материала и непостоянство коэффициента γ . Таким образом показано, что кинетическая концепция прочности может служить научной основой для решения проблемы прогнозирования долговечности циклически нагружаемых твёрдых тел.

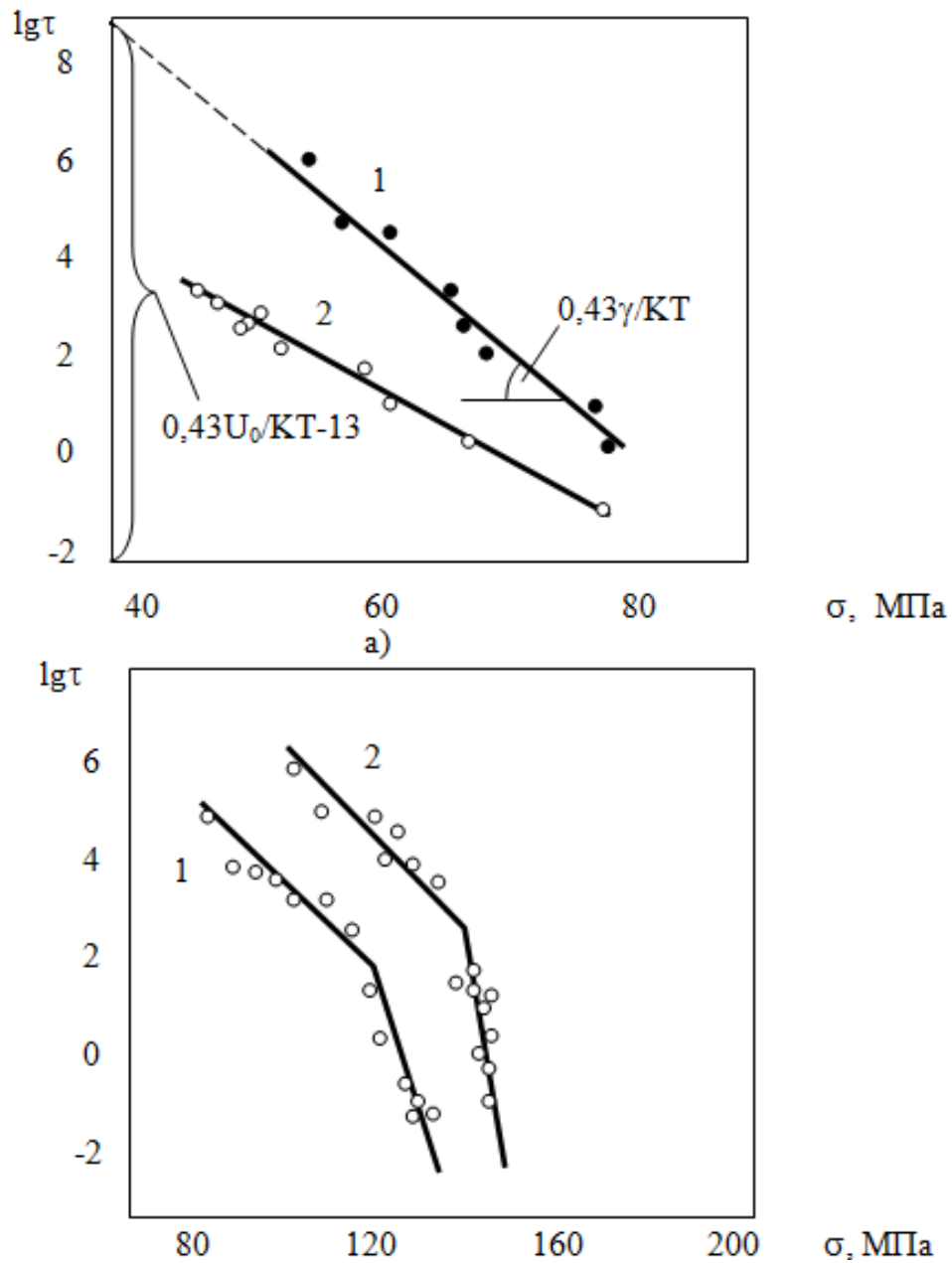


Рисунок 2.8. Силовые зависимости долговечности алюминия при статическом и циклическом нагружениях. а) Статическая (1) и циклическая (2) долговечности алюминия при комнатной температуре (частота нагружения 24 цикл/с) и отсечение экстраполируемой на ось $\lg \tau$ зависимости стабильного значения « $0,43U_0/KT-13$ »; б) Силовые зависимости долговечности алюминия при разных температурах: 1- $T=250$ °C; 2- $T=200$ °C.

Суть долгосрочного прогнозирования механического разрушения состоит в определении времени $\tau_{\text{ост}}^*$, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин C^* путём оценки параметров и решения следующей системы уравнений

$$\begin{cases} \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^{\tau} dt / \theta_{cp}(\omega(t)) \right] \right\} d\omega = C^{\otimes} / C_0 \approx 0,01 \\ \tau_{\text{ост}} = \tau - \tau_{\text{пр}} \end{cases}, \quad (2.2)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ - предварительно потерянный объектом ресурс. Параметры уравнений повреждаемости и, в частности, параметры функции $\Psi(\omega = \gamma\sigma/KT)$ (или γ), $\theta(\omega(t))$ уравнения роста концентрации микротрещин определяют экспериментально по результатам регистрации сигналов АЭ, после чего рассчитывается τ . Для решения приведённой системы уравнений (2.2) необходимо знать параметры первого уравнения системы и величину предварительно потерянного ресурса $\tau_{\text{пр}}$ объекта с уже предварительно накопленной концентрацией микротрещин $C_{\text{пр}}$. При однородном разрушении первое уравнение системы упрощается и приобретает вид

$$\int_0^{\tau} \frac{d\bar{t}}{\Theta_{CP}(\bar{t})} \approx 0,01$$

Трещинообразование в повторно нагруженном образце описывается уравнением

$$dC/dt = (C_0 - C_{\text{пр}} - C) / \theta_{\text{п}},$$

где $C_{\text{пр}} = C_0 t_{\text{пр}} / \theta_{\text{пр}}$, $t_{\text{пр}}$ - время предварительно отработанного периода, $\theta_{\text{пр}}$ - среднее время ожидания разрушения одного структурного элемента за этот период, $\theta_{\text{п}}$ - то же за период последующей работы.

Время же $\tau_{\text{ост}}^*$, оставшееся до разрушения (остаточный ресурс), определяется из условия

$$C(\tau_{\text{ост}}) = C^* - C_{\text{пр}},$$

откуда остаточный ресурс объекта, работающего, например, в режиме постоянного нагружения

$$\tau_{\text{ост}} = \tau - \tau_{\text{пр}} = C * \theta_{\text{п}} / C_0 - t_{\text{пр}} \theta_{\text{п}} / \theta_{\text{пр}}$$

Таким образом, для прогнозирования остаточного ресурса, кроме оценки параметров состояния диагностируемой конструкции, необходимо знать параметры предварительного нагружения. В распространённом случае идентичности режимов предварительной и последующей эксплуатации имеем

$$\tau_{\text{ост}} = C * \theta_{\text{п}} / C_0 - t_{\text{пр}}$$

В случае диагностического нагружения (опрессовка сосудов давления в течение времени $t_{\text{опр}}$) общая потеря ресурса

$$\tau_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{опр}} \theta_{\text{п}} / \theta_{\text{опр}}$$

Основой прогнозирования является связь регистрируемых параметров АЭ ξ с параметрами повреждаемости материала- концентрацией образующихся микротрещин C [83-98, 185] (рисунки 2.9, 2.10).

$$\xi(t) = k_{\text{АЭ}} C(t), \quad (2.3)$$

где t -текущее время, $k_{\text{АЭ}}$ — акустико-эмиссионный коэффициент. Информативными параметрами ξ могут являться любые первичные параметры АЭ- число N_{Σ} регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счёт N АЭ, относительная суммарная амплитуда или комбинация этих параметров. Уравнение (2.3) представляет собой микромеханическую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии (ММАЭ), регистрируемой на стадии мелкодисперсного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности механического состояния материала контролируемого объекта, позволяющую оценить остаточный ресурс. Соотношение входящих в формулы описания функции $\Psi(\omega)$ параметров характеризует степень неоднородности механического состояния материала; параметры τ_0 и U_0 наиболее консервативны и не зависят от состояния структуры, определяются характеристиками межатомного взаимодействия структурного элемента;

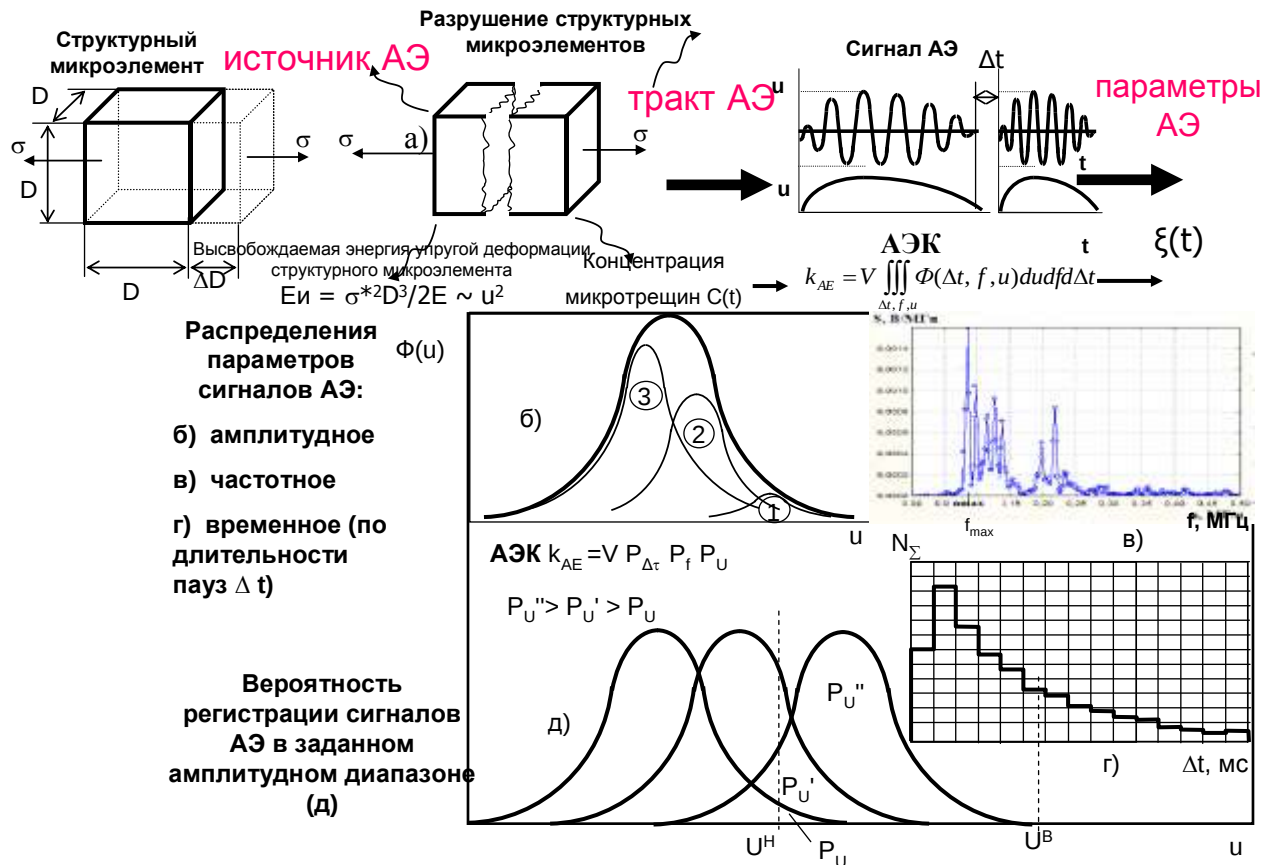


Рисунок 2.9. Микромеханическая модель АЭ: модель источника сигнала (а) и интерпретация значения включающего в себя факторы тракта сигнала АЭ акустико-эмиссионного коэффициента (б, в, г, д). 1,2,3 -распределения от разрушения структурных элементов граничной зоны адгезионных связей композита или материала сварного шва (1), волокна композита или околошовной зоны, зоны нормализации и основного металла сварного соединения (2), матрицы композита или элементов разупрочнённой зоны сварного соединения (3); P_U , P_U' , P_U'' - вероятности попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон $[U^H; U^B]$ при равномерном, экспоненциальном (показательном) и с наличием максимума наблюдаемом амплитудном распределении сигналов АЭ соответственно; $P_{\Delta t}$, P_f -вероятности регистрации сигналов в заданном временном и частотном диапазоне соответственно.

значения параметра $\gamma \approx 10^{-26} \div 10^{-28} \text{ м}^3$ (активационного объёма) являются характеристикой наноструктуры материала, которая слабо чувствительна к его химической природе, совместно с напряжениями σ параметр γ отражает прочностную индивидуальность структурного элемента, а входящий в формулу Журкова (2.1) параметр $\omega = \gamma\sigma/(KT)$ фактически является параметром его прочностного состояния. Акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК) имеет смысл «звучащего» объёма и связан с долей сигналов АЭ регистрируемых из

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t')) \right] \right\} d\omega,$$

где ξ -информативный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда сигналов АЭ), t -текущее время;

k_{AE} -акустико-эмиссионный коэффициент (“звучащий” объём материала);

ω -параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта;

$\Psi(\omega)$ - функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объёма V материала;

$\omega_0, \Delta\omega$ -нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω ;

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t$$

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t)/(KT)$$

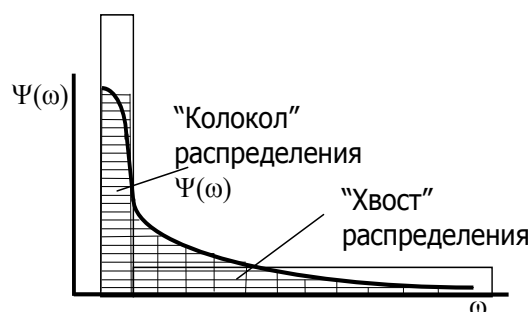
где γ - активационный объём, σ - растягивающие напряжения на микроэlemente.

$$\Psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega} \exp \left[- \frac{1}{2\sigma_3^2} (\ln(\omega) - \mu)^2 \right]$$

$$\Psi(\omega, \omega_0, \omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 0.99/\omega_1, & \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \omega_1] \\ 0.01/\omega_2, & \omega \in (\omega_0 + \omega_1, \omega_0 + \omega_1 + \omega_2] \end{cases}$$

$$\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(KT)]$$

где U_0 - энергия активации процесса разрушения



Моделирование прочностной неоднородности материала

- время разрушения микроэlementa (формула Журкова С.Н.)

Рисунок 2.10. Математическая форма микромеханической модели параметров акустической эмиссии гетерогенных материалов.

общего потока импульсов, прошедших временную, частотную и амплитудную фильтрации.

Математическая модель АЭК

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t$$

где V - контролируемый методом АЭ объём материала, $\Phi(\Delta t, f, u)$ - плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузам) между ними, амплитуде u и частоте f .

Учитывая стохастический характер упругого излучения, входящему в данную формулу интегралу можно придать смысл вероятности регистрации, то есть вероятности попадания параметров упругих волн, пришедших от источника АЭ, в диапазон регистрируемых измерительной аппаратурой частот f , амплитуд u сигналов АЭ и временных интервалов Δt между ними. Вид и поведение определяющих функцию $\Phi(\Delta t, f, u)$ распределений длительности пауз между сигналами, амплитудных распределений, распределение сигналов по частоте, связь между скоростью нагружения, температурой регистрации, видом контактной жидкости и коэффициентом прохождения сигнала, амплитудой, частотой, длительностью сигналов, размером структурных элементов, расстоянием до источника АЭ и числом регистрируемых сигналов изображены на рисунке 2.9.

Наиболее динамично во время проведения АЭ испытаний ведёт себя амплитудное распределение. Его вид связан с распределением размеров разрывов сплошности (разрушенных структурных элементов) гетерогенных материалов, типом дефекта и степенью его опасности, скоростью нагружения, напряжениями на структурных элементах в момент разрушения и порогами дискриминации аппаратуры, а также с метрологическими аспектами АЭ-наблюдений. Последние связаны с чувствительностью АЭ-измерений, которая, в свою очередь, зависит от соотношения величин амплитуды упругой волны и порога дискриминации регистрирующей аппаратуры. При-

нимая гипотезу о нормальном распределении сигналов по амплитуде, становится очевидной связь доли регистрируемых сигналов АЭ, прошедших временную, частотную и амплитудную фильтрацию, и вида наблюдаемого амплитудного распределения. Искажение этого вида при фиксированном пороге дискриминации аппаратуры может быть связано только с изменением энергоёмкости упругого излучения и использовано при обнаружении концентратора напряжений.

Высвобождающаяся в связи с образованием микротрещины потенциальная энергия $E_{\text{и}}$ упругой деформации структурного элемента зависит от его размера D и напряжений σ^* на нем в момент разрушения [42] (см. рисунок 2.9 а)

$$E_{\text{и}} = \sigma^{*2} D^3 / 2E_y \sim u^2,$$

где E_y -модуль упругости материала элемента. Это соотношение учитывает зависимость $E_{\text{и}}$ от размеров и скорости $\dot{\sigma}$ роста напряжений в момент нагружения, поскольку предел прочности [137]

$$\sigma^* = \{U_0 + KT \ln \dot{\sigma} - KT \ln [KT / (\gamma \tau_0)]\} / \gamma \quad (2.4)$$

Часть энергии $E_{\text{и}}$ переходит в энергию упругой волны, которая, по мере приближения к поверхности материала, затухает в зависимости от частоты f волны, коэффициента ее затухания и величины расстояния, пройденного до места регистрации АЭ. Из всей совокупности испускаемых из материала упругих волн энергией E_c акустико-эмиссионной аппаратурой регистрируется только часть попадающих в некоторый амплитудный диапазон, ограниченный верхним U^B и нижним U^H уровнями дискриминации. Разнообразие дефектов, неоднородность структуры и напряжённого состояния гетерогенных материалов, выражающаяся в вариации значений D , σ^* и $\dot{\sigma}$, приводит к разбросу значений амплитуд сигналов АЭ. Это, в совокупности со случайностью процесса разрушения, является причиной вариации значений

вероятности P_u попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон $[U^H; U^B]$ (рис. 2.9 б, в)

$$P_u = \int_{U^H}^{U^B} \Phi(u) du ,$$

где U^H , U^B - нижний и верхний амплитудные пороги дискриминации измерительной аппаратуры, $\Phi(u)$ - плотность вероятности распределения сигналов АЭ по амплитуде u [85,86].

Вариация P_u , а значит и АЭК, становится существенной в условиях низкой чувствительности и дефицита сигналов АЭ даже при стабильных скорости нагружения, порогах дискриминации аппаратуры, коэффициентах усиления и затухания сигнала АЭ. Данная ситуация часто наблюдается при промышленном АЭ-контроле с существенно завышенным (с целью устранения помех) нижним порогом дискриминации u^H или при диагностировании металлоконструкций, работающих с большим запасом прочности. Нестабильность АЭК в момент проведения АЭ-измерений приводит к существенной некорректности контроля, нарушает подобие процессов разрушения и упругого излучения, а неопределённость значения АЭК приводит к погрешностям оценки параметров трещинообразования и понижению точности оценки прочности. Это обстоятельство необходимо учитывать при обработке первичной АЭ-информации посредством регуляризации.

Микромеханическая модель АЭ имеет иерархическую структуру (рисунок 2.11), объединяет физический и статистический подходы к исследованию и использованию явления АЭ, так как описывает процесс случайной регистрации детерминировано накапливаемых повреждений в материале на первой стадии, изменение звучащего объёма, и связанной с напряжением возле трещины амплитуды сигнала АЭ на второй стадии разрушения. Определив параметры этой модели, можно определить состояние или различные показатели прочности исследуемого объекта.

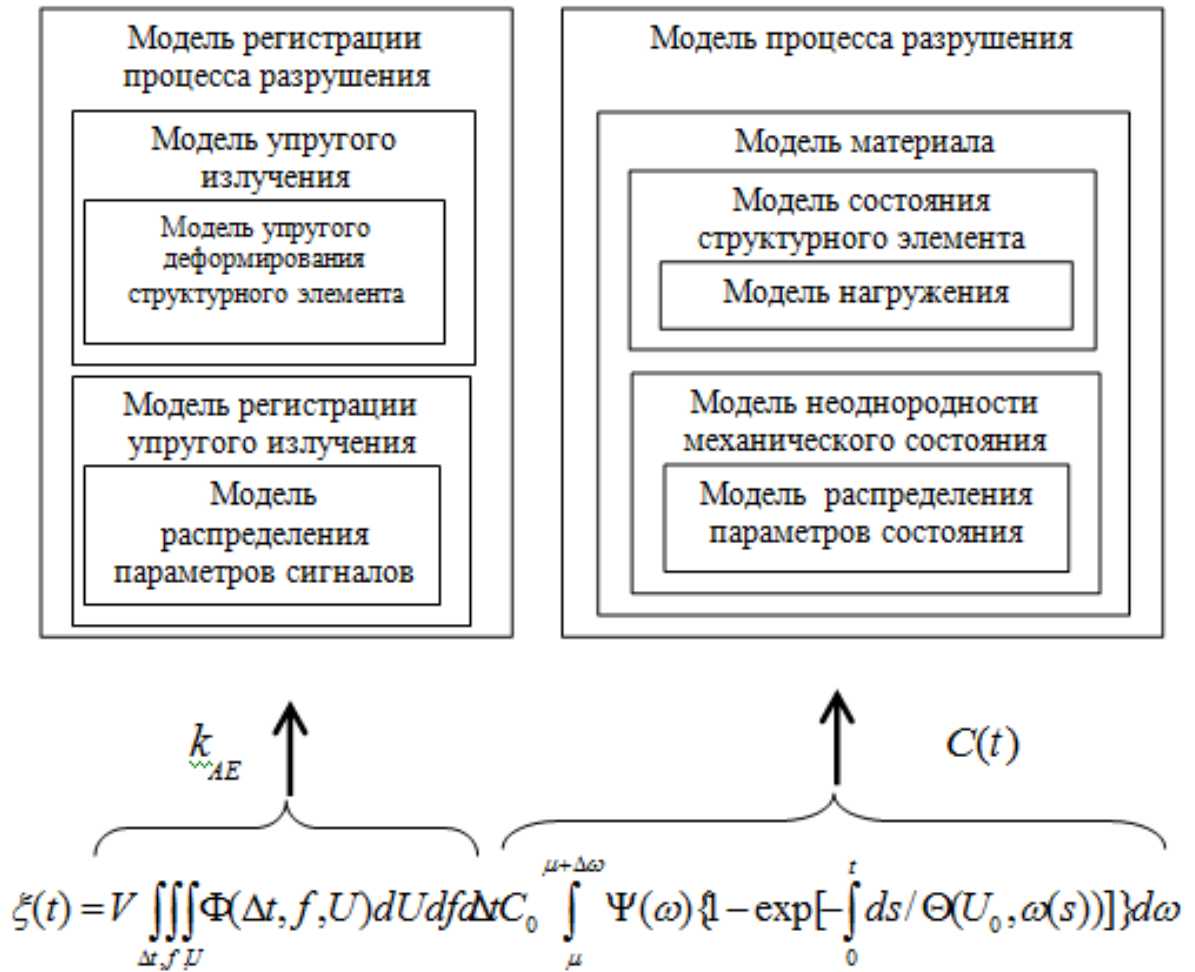


Рисунок 2.11. Структура и вид микромеханической модели АЭ

Вытекающие из изложенных физических основ прогнозирования момента завершения первой стадии разрушения принципы долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса опираются на результаты регистрации АЭ, полученные при корректно проведённых испытаниях и стабильных значения АЭК, присваивающих ему смысл коэффициента подобия между временными зависимостями концентрации микротрещин $C(t)$ и информативными параметрам АЭ $\xi(t)$.

Из модели вытекают физически обоснованные условия корректности регистрации АЭ, которые состоят в обеспечении во время испытаний [94]:

- стабильности контролируемого объёма, диагностируемого объекта;
- стабильности коэффициента усиления и порогов дискриминации измерительной системы АЭ;
- стабильности характеристик энергетического или амплитудного распределения сигналов АЭ;
- подобия диагностического и рабочего нагружения диагностируемого объекта контроля;
- постоянной скорости диагностического нагружения.

Для обеспечения мотивирующего оптимизацию АЭ контроля долгосрочного АЭ-прогнозирования ресурса с позиций микромеханической модели необходимо определиться с оценкой связанных с ресурсом параметров прогностического этапа однородного разрушения, математической и физической регуляризацией (стабилизацией) результатов наблюдений посредством разделения этапов стадии мелкодисперсного разрушения и временной фильтрацией сигналов АЭ. Для совершенствования АЭ контроля необходимо изучать разрушение в условиях неоднородности и кинетику сигналов АЭ неё, их связь с ресурсом, оптимизировать фильтрацию сигналов АЭ от этапа неоднородного разрушения по кинетическим и статистическим признакам, для чего с позиций ММАЭ конкретизировать признаки однородного разрушения, снижать некорректность оценки прогностических

параметров посредством повышения чувствительности контроля, точности идентификации этапа однородного разрушения и стабилизации АЭК на этом этапе.

Адекватность микромеханической модели АЭ подтверждается сопоставлением результатов экспериментальной регистрации (рисунок 2.12). На основе её подбираются диагностические параметры, лежащие в основе алгоритмов оценки прочности и ресурса сложно нагруженных объектов [84,85,86] (таблица 2.2). Алгоритмы апробированы на образцах сварных соединений, изделиях из композиционных материалов, сосудах давления, сварных конструкциях, заготовках для производства горячекатаной полосы методом прокатки; горнодобывающих предприятиях для оценки степени удароопасности участка горного массива.

Таблица 2.2. Концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочностного состояния технических объектов, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов

АЭ-показатель	Микромодель	Наномодель	Свойство
X_{AE}	$d\ln\xi/dt$	$\gamma\dot{\sigma}/KT$	Наноструктура
Y_{AE}	$d\ln\xi/d\sigma$	γ/KT	»
kY_{AE}	$d\ln\xi/dF$	γ/KT	»
W_{AE}	$d\ln\xi/dK_n$	$\omega = \gamma\sigma/KT$	Опасность разрушения

Примечание. F-нагрузка, K_n – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей), $k=\sigma/F$

Время до разрушения при постоянной нагрузке($\sigma=\text{const}$)

$$t^* \approx 10^{-15} \exp(U_0 / KT - Y_{AE} \sigma) = \exp(M - Y_{AE} \sigma) = B / \exp W_{AE} \quad (2.5)$$

где $M \approx U_0 / (KT) - 34$, $B = \exp M$

Предел прочности

$$\sigma^* \approx M / Y_{AE} \quad (2.6)$$

Разрушающая нагрузка

$$F_p \approx M / (k Y_{AE}), \quad (2.7)$$

где F_p' - скорость роста нагрузки при нагружении, $C^*/C_0=10^{-2}$, $k=\sigma/F$ - коэффициент пропорциональности между напряжениями и внешней нагрузкой F . Коэффициент запаса статической прочности

$$S_{CT} \approx \sigma_T Y_R / W_{AE}, \quad (2.8)$$

где σ_T -предел текучести, Y_R -параметр кривой усталости.

Число циклов до разрушения

$$N_C = N_B / \exp W_{AE}, \quad (2.9)$$

где N_B – характеристический параметр материала, температуры и частоты его нагружения, определяется по кривой усталости образцов данного материала (параметр «0,43U₀/KT-13» рисунка 2.8). В качестве неизвестных параметров формул (2.5)-(2.9) выступают концентрационно-кинетические показатели таблицы 2.2, определение которых по результатам контроля позволяет оценить прочностной ресурс. Стабилизация коэффициентов этих формул делает решение задачи устойчивым, а универсальность формул - не требующим проведения обучающего эксперимента.

Выводы по главе 2.

1. Совершенствование АЭ контроля прочности следует вести на основе информативного физического моделирования, снижающего неопределённость количественных АЭ выражений процесса разрушения, контролируемого в условиях прочностной и метрологической неоднородности. Статистический подход к АЭ разработке методик оценки ресурса сжимаемых элементов должен быть рассмотрен только как вспомогательный в виду его низкой информативности. Помехоустойчивость должна обеспечиваться физически обоснованной формулировкой понятия помехи, вытекающими из этого методами её устранения и корректностью АЭ контроля.

2. В основе информативного физического моделирования должны быть положены универсальные физические закономерности с обоснованными константами моделируемого процесса. В качестве таковых выбраны микромеханическая модель АЭ (ММАЭ), дискретизация стадии мелкодисперсного разрушения на различающиеся по прогностическим свойствам этапы неоднородного и однородного разрушения, относительно стабильные параметры модели однородного разрушения и ему соответствующей временной зависимости параметров корректно регистрируемой АЭ.

3. Возможность совершенствующего АЭ контроль долгосрочного АЭ-прогнозирования ресурса при этом обеспечивается определением связанных с ресурсом представительных концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочностного состояния технических объектов, устойчивых к влиянию дестабилизирующих факторов, и универсальностью физически обоснованных формул расчёта показателей ресурса, не требующих проведения обучающего эксперимента.

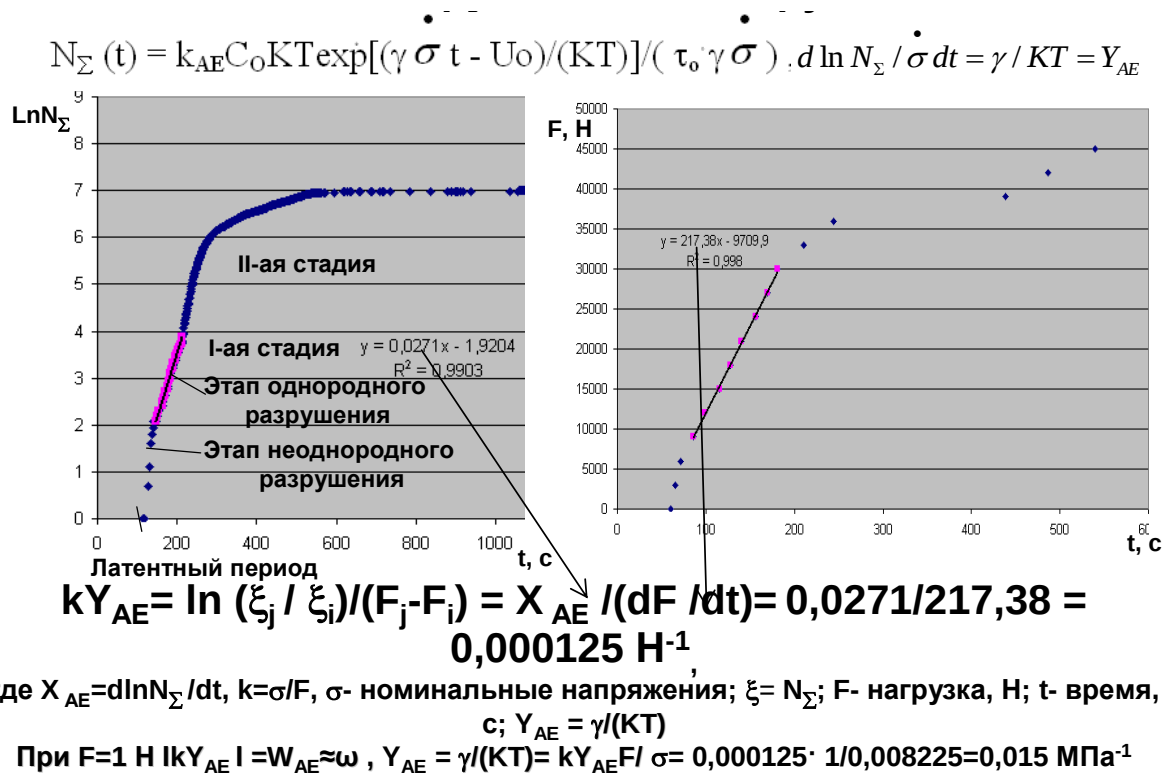
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ СЛОЖНО НАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ АЭ-ПОКАЗАТЕЛЕЙ

3.1. Метрологические аспекты акустико-эмиссионной оценки концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочности

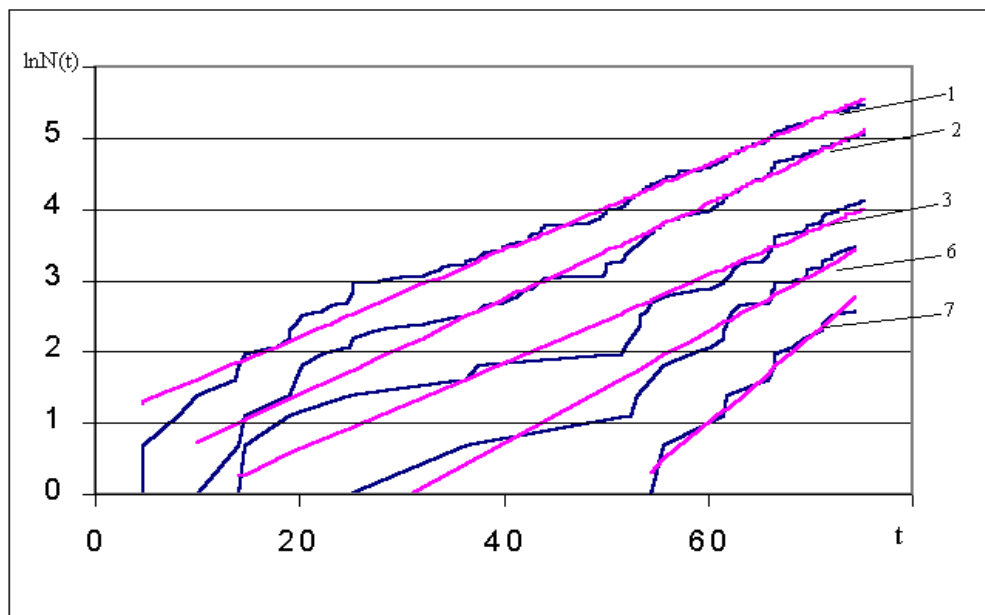
Предложенные концентрационно-кинетические показатели вытекают из структурно-вероятностной микромеханической модели параметров АЭ, связываются с кинетикой разрушения, стандартными прочностными характеристиками материала и ресурсом объекта контроля. Проведём анализ диагностической ценности данных показателей по их контролепригодности, помехоустойчивости и информативности.

Контролепригодность. На рисунке 3.1 а показано построение временной зависимости логарифма числа импульсов $\ln N_{\Sigma}$, регистрируемых при равномерном нагружении образцов сварных соединений, и определения концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочности Y_{AE} и kY_{AE} . Коэффициент $k=\sigma/F$ здесь вводится для повышения контролепригодности в случаях сложности определения номинальных напряжений σ , необходимых для определения параметра Y_{AE} , и замены их значений соотношением $\sigma=kF$. Такая замена не искажает общую оценку в случае геометрического подобия диагностического и рабочего нагружения, обеспечивающего равенство значений k .

Влияние амплитудной фильтрации посредством вариации порогов дискриминации измерительной системы АЭ на параметры Y_{AE} и X_{AE} показано на рисунке 3.1 б. Убирая низкоамплитудные сигналы, моделируем повышение порога дискриминации аппаратуры.



а)



б)

Рисунок 3.1. Процедура определения диагностических показателей прочности X_{AE} , kY_{AE} и Y_{AE} (а) и графическое изображение влияния амплитудной фильтрации на их значение (б) 1- исходная зависимость $\ln N(t)$, 2-отфильтровано 35 % сигналов, 3-62%, 6-87%, 7-93%

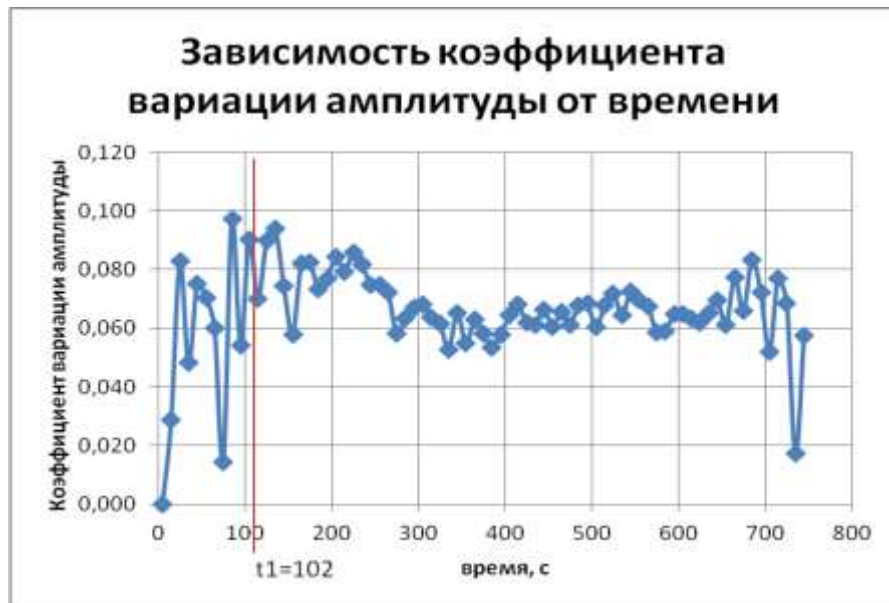
Как видно из рисунка 3.1 б, незначительное изменение порога дискриминации измерительной системы АЭ не влияет на значение показателя X_{AE} и лишь завышая порог дискриминации до уровня, при котором отсекается более 80% данных, получаем изменение показателя X_{AE} более чем на 20%. Влияние вариаций значений акустико-эмиссионного коэффициента k_{AE} на точность оценки диагностических параметров (мультипликативные помехи, связанные с отступлением от условий корректности АЭ наблюдений) может быть снижено посредством математической регуляризации (стабилизации) - количественного учёта изменения k_{AE} , связанного, чаще всего, с изменением доли контролируемого объёма материала. В частности, при изменении амплитудного распределения (изменении P_U на рисунке 2.9) это может быть сделано посредством вычитания связанного с изменением средних значений амплитуд и вида амплитудного распределения функционала [24].

Выделение прогностического этапа процесса и идентификации используемого при оценке Y_{AE} этапа однородного разрушения производилась посредством временной дискретизации первой стадии разрушения и фильтрации сигналов АЭ по различным признакам [91]:

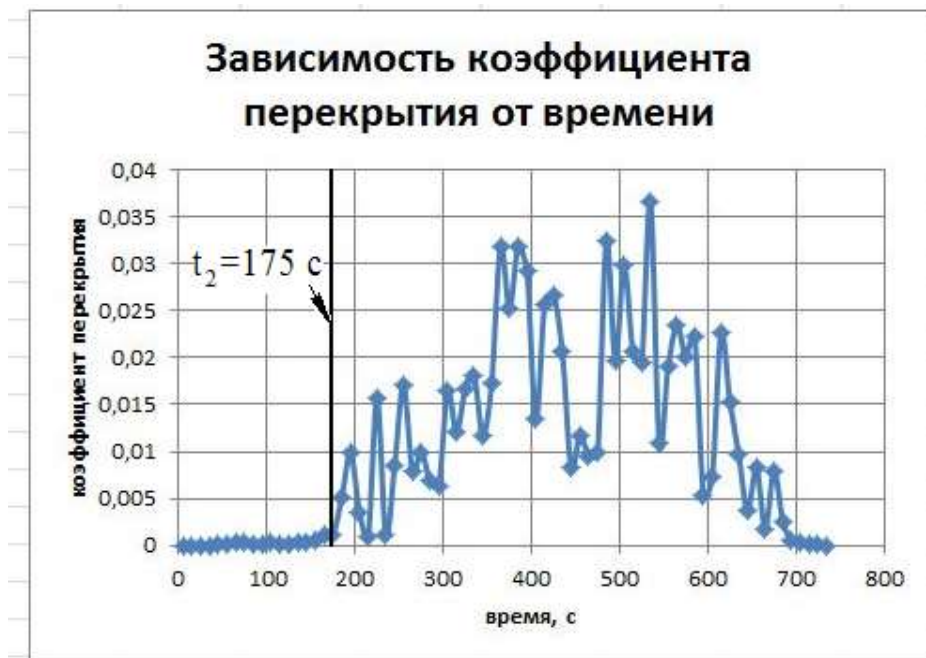
1. Кинетическому, связанному с аппроксимированием временной зависимости первичных информативных параметров АЭ кинетикой однородного разрушения (см. рисунок 3.1);

2. Статистическому, связанного со стабилизацией значений амплитудных, частотных и паузных распределений сигналов АЭ на этапе однородного разрушения (рисунок 3.2).

3. Признаку упругого деформирования - контролироваться должно типичное для многоциклового хрупкое разрушение без макропластических перестроек структуры и связанных с ними АЭ эффектов (повышение коэффициента перекрытия сигналов АЭ и пр.).



а)



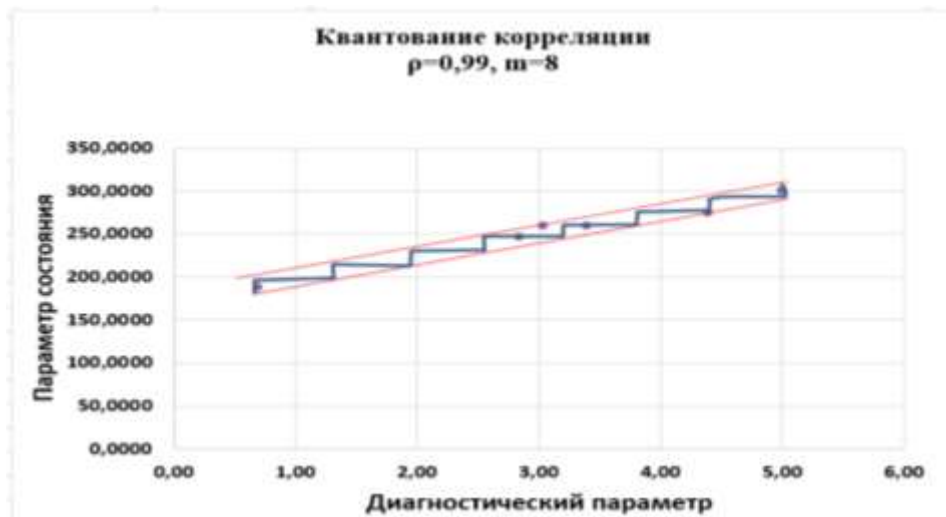
б)

Рисунок 3.2. Временная фильтрация сигналов АЭ: (а)-определение момента времени t_1 начала этапа однородного разрушения по графику зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени; (б)- определение момента времени t_2 окончания этапа однородного разрушения по графику зависимости коэффициента перекрытия импульсов АЭ от времени.

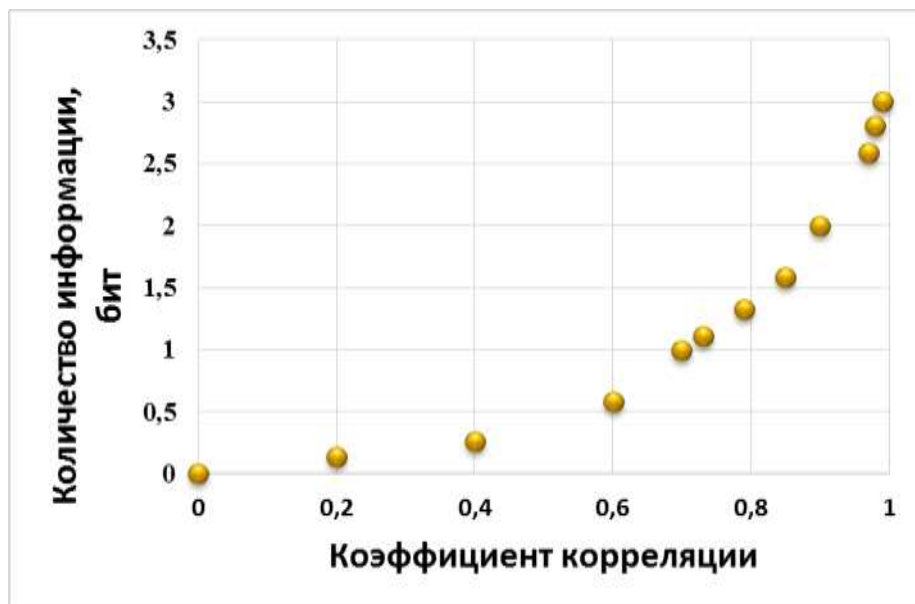
Информативность характеризуется количеством информации о состоянии объекта контроля, которая, согласно теории информации [135], отражает степень снижения неопределённости состояния объекта, связываемой с количеством уровней квантования диапазона рассеяния возможных значений параметра. Количество этих уровней графически связано с облаком рассеяния коррелируемых случайных величин (рисунок 3.3 а), а значение коэффициента корреляции – с количеством информации, получаемой при контроле (рисунок 3.3 б). Таким образом, коэффициент корреляции значений диагностического параметра и параметра состояния объекта контроля может выполнять функцию коэффициента информативности диагностического параметра и характеризовать его диагностическую ценность. В качестве параметра состояния при оценке прочности могут быть приняты стандартные характеристики ресурса или степени опасности состояния –разрушающая нагрузка, время, число циклов до разрушения или появления трещины, действующие напряжения, коэффициент запаса прочности. Если принять этот коэффициент (информативности диагностического параметра) за критерий оптимизации контроля, то повышение его значения будет означать оптимизацию АЭ контроля. Применение концентрационно-кинетических показателей для оценки прочности плоских образцов сварных соединений (рисунок 3.4) позволяет интерпретировать показанные в таблицах 3.1-3.3 и рисунка 3.5 результаты, как иллюстрацию оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений посредством предпочтительного применения в качестве диагностических параметров концентрационно-кинетических показателей Y_{AE} и kY_{AE} . Значения разрушающей нагрузки F_p рассчитывались по развёрнутому аналогу формулы (2.4, 2.7) [39, 85-89]

$$F_p = (U_0 / (KT) + \ln(\tau_0 C^* / C_0 F_p' \cdot kY_{AE})) / (kY_{AE}),$$

где F_p' - скорость роста нагрузки при нагружении, $C^*/C_0 = 10^{-2}$.

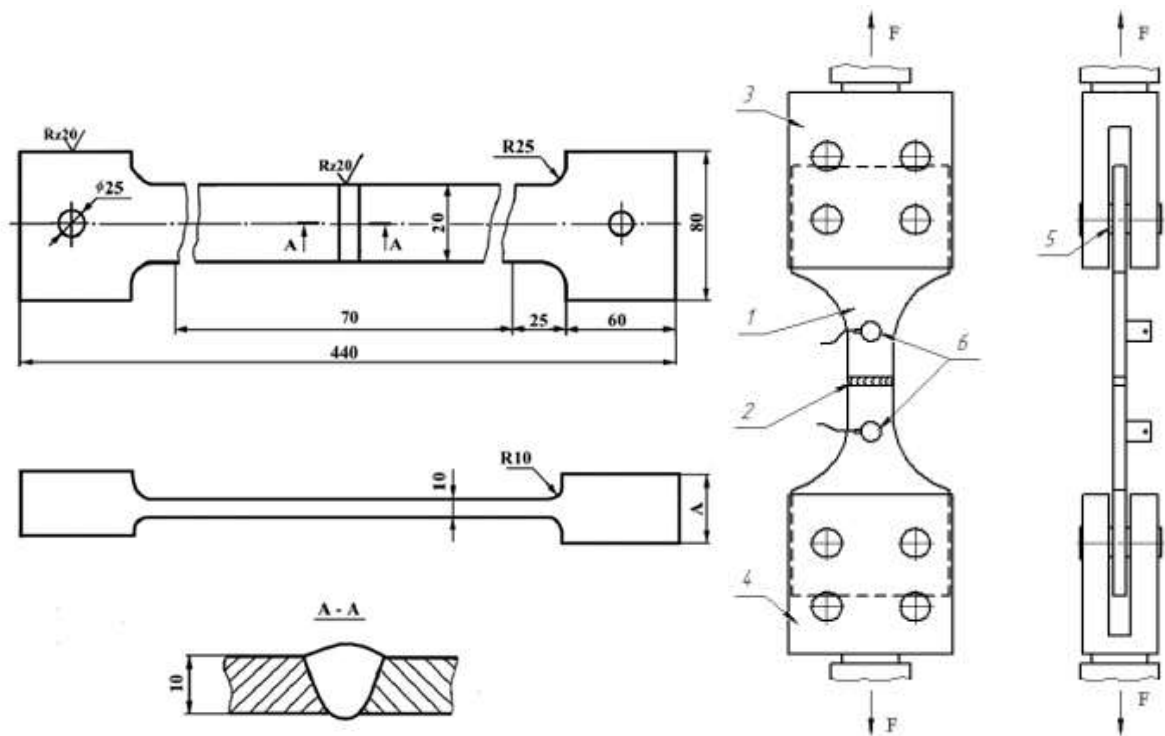


а)

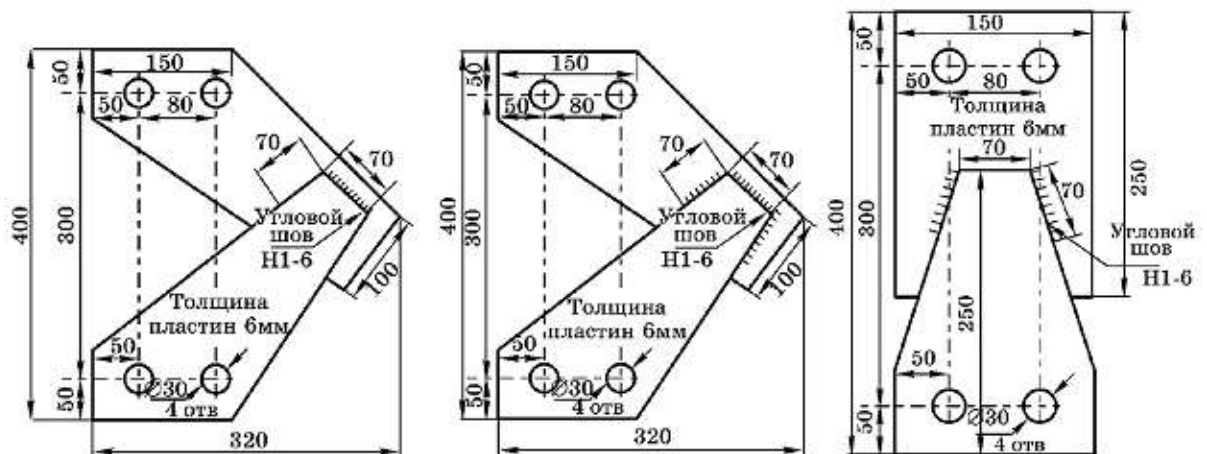


б)

Рисунок 3.3. Квантование корреляции диагностического параметра с параметром состояния объекта контроля (а) и связь значений коэффициента этой корреляции с количеством получаемой при диагностировании информации (б). ρ -коэффициент корреляции, m - количество уровней квантования, $H=\log_2 m$ - количество информации (по Хартли, в битах)



а)



б)

Рисунок 3.4. Образцы сварных соединений: а – стыковых сварных соединений, предназначенные для испытания на растяжение [8, 61, 91]; б – образцы нахлесточных сварных соединений, предназначенные для испытания сварных швов на сдвиг [39, 91]. 1 – образец; 2 – сварной шов; 3 – верхний захват нагружающего устройства; 4 – нижний захват нагружающего устройства; 5 – палец; 6 – преобразователь АЭ.

Таблица 3.1 Параметры АЭ для образцов растягиваемых стыковых сварных соединений

№ обр.	F_3 , Н	скорость роста нагрузки F_3' , Н/с	Без учета амплитудного распределения			С учетом амплитудного распределения		
			Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ^* , %	Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ , %
5	135869	21,74	0,0064	102840	24	0,0038	145767	7
6	135869	21,57	0,004	140645	4	-0,0004**	-	-
7	67199	48,00	0,025	43564	35	0,0224	47640	29
8	82796	19,25	0,010	72316	13	0,01	72316	13
9	54328	18,26	0,012	62419	15	0,0122	61667	14
10	52484	18,51	0,017	48319	8	0,0166	49197	6
11	113256	17,91	0,01	70864	37	0,0098	71898	37
12	117720	20,65	0,0058	108316	8	0,004	138480	18
13	38455	27,47	0,015	58354	52	0,0156	56612	47
14	4022	6,36	0,116	8551	113	0,1152	8593	69
15	11723	39,08	0,061	20104	71	0,0618	19886	70
Средние значения					11			10 (для 10 обр.)
Корреляция с F_3				0,917			0,910	

*Относительная ошибка определена как отношение разницы между расчетной и действительной разрушающими нагрузками к действительной разрушающей нагрузке бездефектного образца

**Знак «-» обусловлен влиянием неоднородности состояний структурных элементов образцов, проявляющейся на рассмотренных этапах нагружения

Таблица 3.2 Связь значений различных прочностных АЭ - показателей образцов нахлесточных сварных соединений с величинами расчётных напряжений

Тип обр.	Число отверстий и их расположение в шве	Максимальные напряжения (по Мизесу), $\sigma_{\max}$ Па	Номинальные напряжения, Па	N_{Σ}	$A_{\text{ср}},$ дБ	$E_{\text{ср}},$ $\text{мВ}^2/\text{хмс}$	$kY_{\text{АЭ}},$ 10^{-6} Н^{-1}	m
1	0	85679	52964	188	65,7	46,9	53	2,83
	1 (в нагр. зоне*)	191562	59175	28	64,7	24,4	227	3,65
	1 (в разгр. зоне)	180963	59175	26	71,7	167,2	91	3,06
	2	267166	66163	38	67,6	111,2	349	4,96
	4	272232	73386	8	70,7	1475	387	6,74
2	0	66045	8225	48	66,5	198,4	125	5,78
	3 (в нагр. зоне)	76696	8985	22	67,9	155,6	44	1,14
	3 (в разгр. зоне)	71085	8903	51	67,2	49,7	65	3,67
	6	75532	9800	62	65,4	88,8	78	3,62
	12	77589	11718	26	70,3	174,4	89	2,44
3	0	24504	1701	27	70,5	209,4	19	2,41
	2 (в нагр. зоне)	25591	1823	79	69,0	131,1	11	1,27
	2 (в разгр. зоне)	25464	1823	27	67,4	179,3	15	6,43
	4	25713	1965	41	71,6	782,1	42	2,06
	8	25847	2328	50	64,3	7,2	66	1,74
Коэф. кор. с $\sigma_{\max}$			0,93	-0,24	0,1	0,38	0,93	0,48

*в нагр. зоне- отверстие выполнено в нагруженной зоне образца;

в разгр. зоне- отверстие выполнено в разгруженной зоне образца.

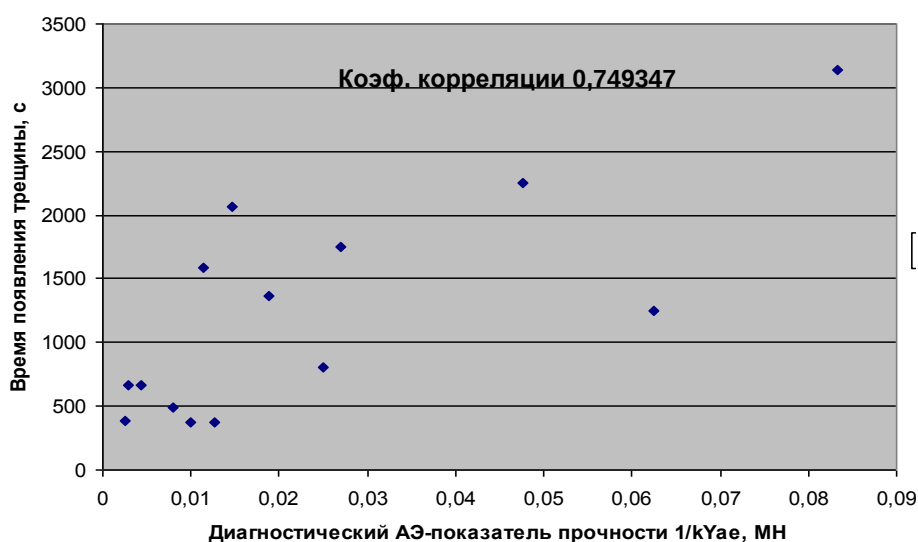


Рисунок 3.5. Корреляция расчётных значений диагностического показателя $1/kY_{\text{АЭ}}$ и момента появления трещины образцов нахлесточных сварных соединений

Таблица 3.3

**Коэффициенты корреляции различных
диагностических показателей с
характеристиками прочности образцов сварных соединений**

Диагностический показатель Характеристика прочности и вид сварного соединения	АЭ-показатель $1/(kY_{AE})$	Концентра- ционно- кинетичес- кий АЭ- показатель kY_{AE}	Средняя амплитуда U сигнала АЭ на этапе упругого нагружения (ПБ-03-593-03)	Показатель m Иванова- Быкова (ПБ-03-593- 03)	Комплексная геометрическая характеристика поперечного сечения W_{KH}
Долговечность, нахлѣст	0,749347	-0,56025	0,003395	-0,550393	0,7504129
Разрушающая нагрузка, нахлѣст	0,807676	-0,696661	0,077404	-0,37518	0,9257129
Разрушающая нагрузка, нахлѣст и встык	0,798476	-0,699067	-	-	0,9032502

Таблица 3.4

**Сравнение диагностических показателей АЭ и полезной площади $A_{пол}$
поперечного сечения образцов сварных стыковых соединений по
представительности оценки разрушающей нагрузки**

Показатели точности оценки	Диагностический показатель для расчёта разрушающей нагрузки $F_{рп}$						
	N_{Σ} , Уравнение регрессии $F_{рп} = a +$ $+ b \exp(-hN_{\Sigma})$	$kY_{AE}, F_{рп}=(U_0/(KT)-35+\ln(F_p \cdot kY_{AE}))/kY_{AE}$					$A_{пол,,}$ $F_{рп} =$ $= A_{пол} \sigma_b$
		Используемый информативный параметр ξ					
		по N_{Σ}^* БУАР	по N_{Σ}'	по N_{Σ} СУАР	по $\Sigma U'$	по N_{Σ} общий**	
отн. ошибка, %	56,532	20,812	20,483	18,020	17,422	12,089	9,886
Козф. кор. фактической $F_{рд}$ и расчётной $F_{рп}$	0,382	0,636	0,781	0,703	0,725	0,8322	0,914
$K_{предст}$	0,156	0,693	0,864	0,884	0,943	1,420	2,096

В таблице 3.3, приведены значения коэффициента корреляции различных диагностических показателей с разрушающей нагрузкой и моментом появления трещины. В таблице 3.4, приведены формулы оценки коэффициентов запаса прочности и ресурса с помощью показателя Y_{AE} , показаны способы формирования диагностического признака на основе определения параметра кривой усталости Y_R и его сравнение с диагностическим показателем Y_{AE} (рисунки 3.6, 3.7), в таблице 3.5 приведены общие сведения по диагностическим признакам этапов разрушения и приблизительные рекомендации по оценке ресурса в соответствии с идентифицируемой стадией и этапом процесса разрушения. Приведённые на рисунке 3.7 значения Y_R согласуются со значениями параметра Y_{AE} образцов АЭ таблицы 3.2, рисунка 3.1. Данные результаты показывают метрологические преимущества предложенных концентрационно-кинетических прочностных АЭ показателей перед стандартными.

3.2. Анализ применения концентрационно-кинетических АЭ показателей для оценки прочности промышленных объектов

Подробные примеры оценки прочности сварных конструкций и изделий из композиционных материалов приведены в работах [85, 86, 91-94]. Рассмотрим результаты АЭ-контроля прочности абсорбера очистки сероводорода К-2 при её гидронагрузке [93]. На колонну, состоящую из 8 поясов сваренных встык листов были установлены 33 датчика АЭ, с помощью которых снимались значения первичных параметров АЭ – количество и время регистрации импульса, его амплитуда и количество выбросов в каждом импульсе. Наибольшее количество датчиков было установлено на самом потенциально опасном нижнем поясе (№8, рисунок 3.8) [93]. По результатам испытаний построены графики зависимости натурального логарифма информативного параметра АЭ ξ от времени (рисунок 3.9 а). В качестве

информативных параметров рассматривались количество сигналов, амплитуда сигналов, количество выбросов, произведения количества выбросов на амплитуду сигнала. По графикам были определены параметры X_{AE} и Y_{AE} как отношения приращения логарифма параметра к приращению времени или напряжений, рассчитанных по формуле Лапласа при известном давлении в абсорбере (рисунок 3.9 б).

Показатели прочности	Формула оценки показателя прочности
Коэффициент запаса статической прочности	$S_{ст} = \frac{\sigma_a Y_R}{\sigma_{раб} Y_{AE}}$
Коэффициент снижения предела выносливости	$K_{ПП.B} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{RD}} = \frac{(\ln N_B - \ln N_B) / Y_R}{(\ln N_B - \ln N_B) / Y_{AE}} = \frac{Y_{AE}}{Y_R}$
Исходный ресурс (от начала эксплуатации до образования трещины)	$N_y = \omega_N C^* \tau_0 / C_0 \exp\left(\frac{U_0}{KT} - Y_{AE} \sigma\right) = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma)$
Остаточный ресурс	$N_{OCT} = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma) - N_{ПП}$

Y_R -параметр кривой усталости эталонного образца;

Y_{RD} -параметр кривой усталости диагностируемого образца, оцениваемого из уравнения

$$Y_{RD} = Y_{AE}$$

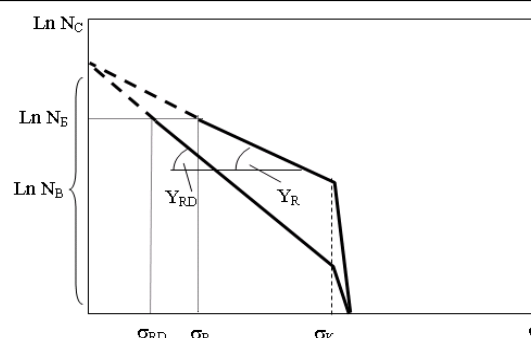


Рисунок 3.6. Оценка ресурса и стандартных показателей прочности с помощью параметра Y_{AE}

Таблица 3.5. Оценка работоспособности и классификация источников АЭ

Вид состояния и класс источника АЭ	Значение параметра Y_{AE}	Характеристика работоспособности изделия и источника АЭ
I	$Y_{AE} \leq 0$	Работоспособное, пассивный
II	$0 < Y_{AE} < Y_R$	Работоспособное, активный
III	$Y_R \leq Y_{AE} \leq [S]Y_R$	Ограниченная работоспособность, критически активный
IV	$Y_{AE} > [S] Y_R$	Неработоспособное, катастрофически активный

[S]-нормативный коэффициент запаса прочности

$$Y_R = d \ln N_c / d \sigma = d \lg N_c / (0,43 d \sigma).$$

$$d \lg N_c / d \sigma = 0,43 Y_R$$

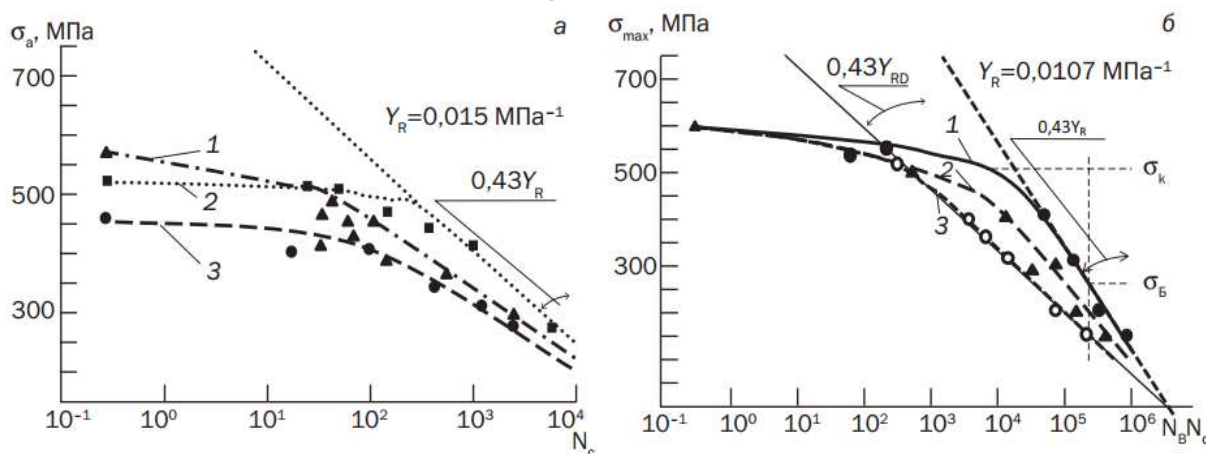


Рисунок 3.7. Кривые малоциклового усталости сварных соединений

а) Результаты малоцикловых испытаний различных зон бездефектных

сварных соединений стали ВМСт3сп: 1-металл углового шва;

2-металл зоны термического влияния стыкового соединения; 3-основной металл; б) Результаты малоцикловых испытаний стыковых соединений стали

10XCHD толщиной 20 мм: 1-качественное соединение; 2-угловатость (8 мм на длине 1м); 3- непровар 4 мм [71, 129]. Значения Y_R согласуются со

значениями параметра Y_{AE} образцов АЭ таблицы 3.2, рисунка 3.1.

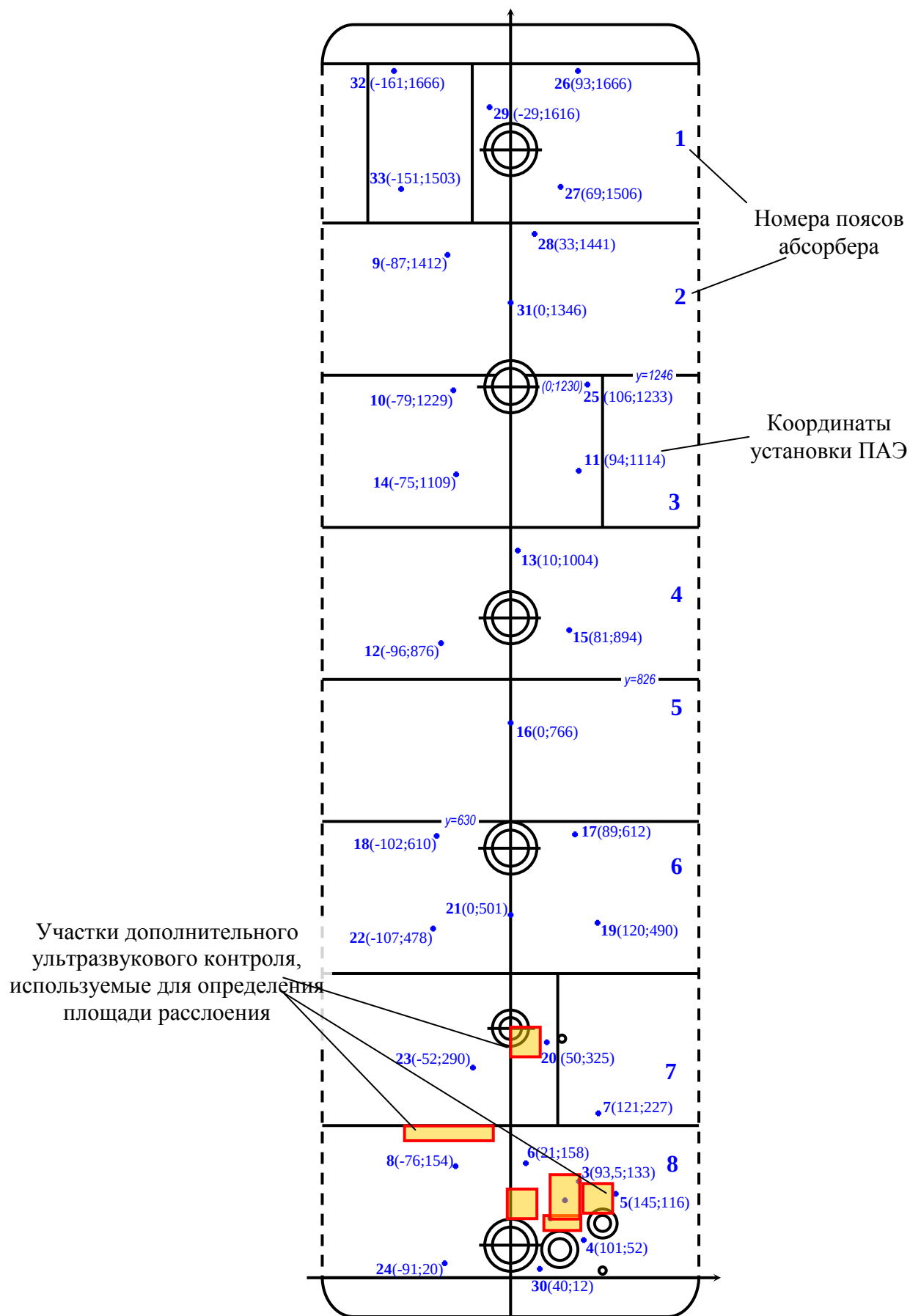
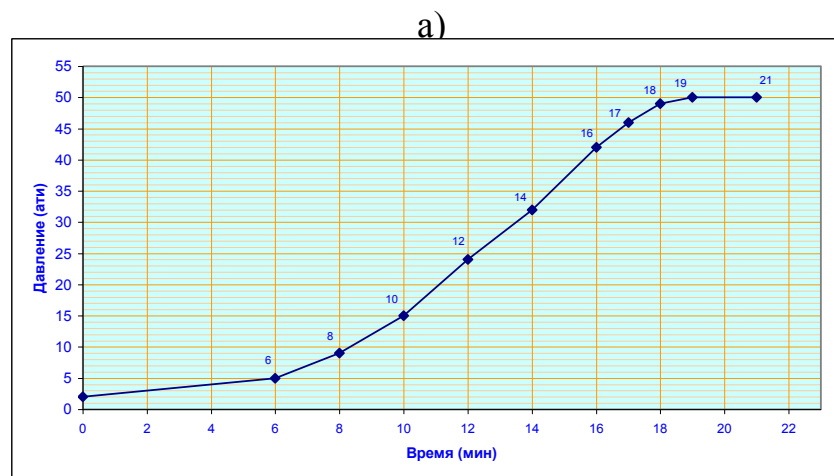
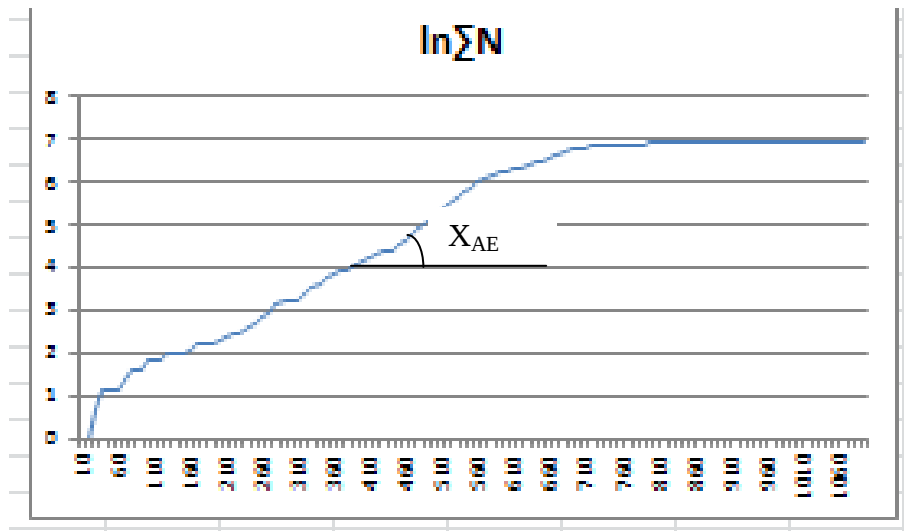


Рисунок 3.8. Схема расположения ПАЭ, номера поясов колонны и расположения участков дополнительного ультразвукового контроля К-2.



б)

Рисунок 3.9. Типичный вид временной зависимости логарифма числа импульсов АЭ одного из каналов(а) и график нагрузки (б) абсорбера очистки сероводорода.

По формуле (2.9) был определён ресурс зон колонны возле преобразователей. Знание величин Y_R и Y_{AE} , рабочих напряжений и предела прочности позволяет рассчитать коэффициент запаса статической прочности и коэффициент снижения предела выносливости (см. формулы рисунка 3.6).

Для проверки устойчивости диагностических параметров к аддитивным помехам обработке подвергались две группы результатов регистрации сигналов АЭ, отличающиеся по амплитудному признаку отбраковки шумовых сигналов. В первой группе опытов отбрасывались низкоамплитудные сигналы, а во второй из рассмотрения были исключены сигналы со слишком большим количеством выбросов. Таким образом, были определены прочностные показатели для зон каждого датчика, которые были сгруппированы по поясам (рисунок 3.8.) и сведены в обобщающую таблицу 3.6, где определены коэффициенты корреляции с номером пояса и построена соответствующая

Таблица 3.6. Значения коэффициентов корреляции параметров контроля с номером пояса абсорбера

Параметр, по которому определяется X_{AE}	$X_{AE\text{ср}}, c^{-1}$	$X_{AE\text{макс}}, c^{-1}$	Мин. коэф. запаса статической прочности	Остаточный ресурс максимальный, лет
Полный набор сигналов АЭ				
Кол-во сигналов	0,984	0,909	-0,85	-0,955
Суммарная амплитуда сигналов	0,967	0,942	-0,815	-0,964
Количество выбросов	0,752	0,969	-0,597	-0,837
Произведения кол-ва выбросов на амплитуду сигнала	0,736	0,646	-0,602	-0,845
Сокращённый набор сигналов АЭ				
Количество сигналов	0,973	0,511	-0,604	-0,664
Суммарная амплитуда сигналов	0,442	-0,233	-0,575	-0,331

диаграмма (рисунок 3.10). В таблице 3.7. приведены значения коэффициентов корреляции параметров с площадью расслоения, определённой ультразвуковым методом.

Таблица 3.7. Корреляция площади расслоения с параметром X_{AE} и суммарным количеством импульсов $N_{сумм}$

Параметр, по которому определяется X_{AE}	$A-X_{AE}$	$A-N_{сумм}$
Полный набор сигналов АЭ		
Количество сигналов	0,842	0,621
Амплитуда сигналов	0,85	0,621
Количество выбросов	0,851	0,621
Произведения количества выбросов на амплитуду сигнала	0,851	0,621
Отфильтрованный набор сигналов АЭ		
Количество сигналов	0,839	0,793
Амплитуда сигналов	0,823	0,793

Выводы по главе 3

Предложенные концентрационно-кинетические АЭ показатели прочности являются базой для оптимизации АЭ контроля. Критерием оптимизации является коэффициент корреляции значений диагностического параметра и показателя работоспособности объекта контроля-характеристик ресурса или степени опасности состояния (действующих напряжений, времени до разрушения, коэффициента запаса или стандартных характеристик прочности).

Показана эффективность использования предложенных АЭ показателей для оценки ресурса сложно нагруженных промышленных объектов. Для адаптации АЭ контроля применительно к сжимаемым элементам конструкций глубоководных сооружений необходимо апробировать разработанные алгоритмы обработки первичной АЭ информации, оценки степени опасности дефектов, прочности и ресурса применительно к корректному и легко реализуемому диагностическому нагружению.



Рисунок 3.10. График зависимости X_{AE} от номера пояса абсорбера.

ГЛАВА 4 ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СЖИМАЕМЫХ СВАРНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ И АНАЛИЗ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

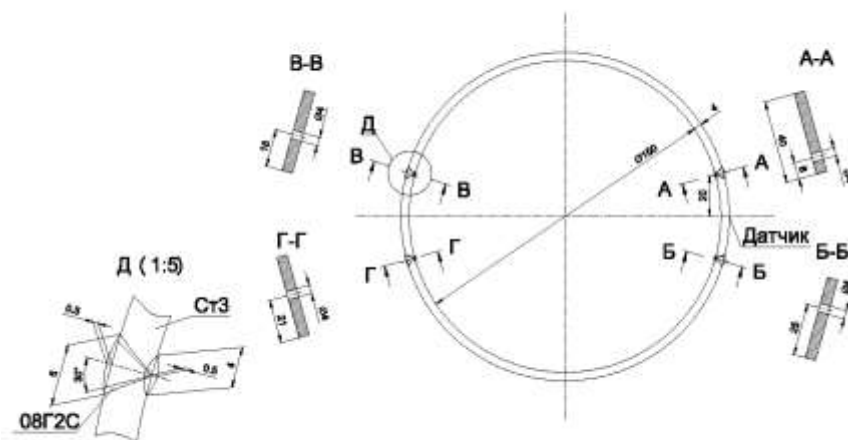
4.1. Методика экспериментальных исследований

Рассмотренный в предыдущих главах информационно-кинетический подход к оптимизации АЭ контроля позволяет описать процесс накопления повреждений в свойственных сжимаемым конструкциям условиях существенной прочностной неоднородности, что является необходимой предпосылкой отбора информативных сигналов АЭ и оценки диагностических параметров, связанных с характеристиками прочности и несущей способности элементов конструкций глубоководных сооружений. Для реализации оценки требуется определение параметров микромеханической модели по результатам акустико-эмиссионного наблюдения за процессом разрушения на этапе однородного разрушения, а для подтверждения возможности определения этих параметров и анализа их информативности были проведены лабораторные экспериментальные исследования образцов.

Исследования проводились на образцах, которые представляли собой замкнутые кольца (рисунок 4.1). Каждый образец был изготовлен из четырех сегментов, сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов – сталь марки Ст3. Образцы имели размеры: диаметр 150 мм ширина 40 мм, отклонение от круговой формы 1 мм на радиус. В сварных швах четырёх образцов искусственно создавались дефекты - отверстия диаметром 4 мм различной глубины. Один образец создавался без дефектов.

Для инициирования сигналов АЭ необходимо создать в стенках корпуса напряжения, имитирующие напряжения, действующие при работе аппарата на глубине. Однако, изготовление камеры, создающей всестороннее наруж-

Образец 1



Образец 2

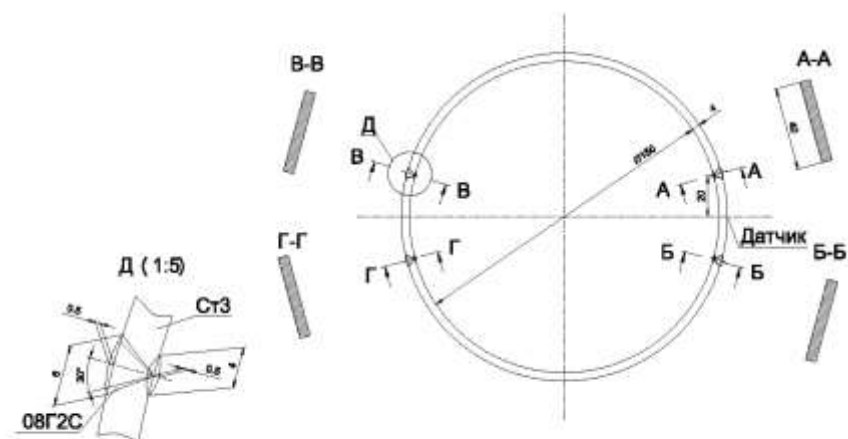


Рисунок 4.1. Образцы сваренных встык колец для АЭ испытания при сжатии

Рисунок 4.1. Образцы сваренных встык колец для АЭ испытания при сжатии
(продолжение).

ное нагружение крупногабаритного корпуса, весьма трудоёмко, поэтому в качестве тестового предложено использовать одноосное радиальное нагружение, направленное в сторону наибольшего нагружающего воздействия на сварные швы (рисунок 4.2). Нагружение образцов проводилось на нагружающем устройстве, разработанном профессором Жуковым В.А., модернизированным для реализации сжимающих нагрузок, в процессе которого регистрировались сигналы АЭ. Для реализации тестового нагружения было спроектировано и изготовлено специальное приспособление, преобразующее расходящееся перемещение захватов нагружающего устройства в сходящееся опорных частей устройства [187] (рисунки 4.2, 4.3, а). Кольца укладывались на две параллельные опоры приспособления и сверху к ним прикладывается нагрузка, также распределенная по двум линиям контакта [93-97,184-196].

Выполненный с применением программы Autodesk Inventor Professional со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ ANSYS Design Space [177] анализ напряженного состояния всесторонне сжатого кольца показал, что напряжения в его стенках распределяются аналогично предложенной схеме одноосного сжатия, что позволяет осуществить необходимое для прочностного анализа корректное нагружение. Также установлено, что для создания напряжений равных возникающим на предельной глубине, к нему необходимо приложить радиальное сжимающее усилие в 1800 Н (рисунок 4.2 г). Протяженность зоны повышенных напряжений, превышающих 0,75 предела текучести (зона красного цвета) при гидростатическом сжатии составляла 62 мм (рисунок 4.2 в), при радиальном - 53 мм (рисунок 4.2 г).

Наблюдение за процессом разрушения проводилось с помощью автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы СДЭ-16(2) (зав. № 0103, ООО "НПП Промдиагностика" г. Санкт-Петербург, сертификат RU.C.27.001.A № 15714, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 25450-03, рисунок 4.3.г), описанной в [24, 85]. Основные

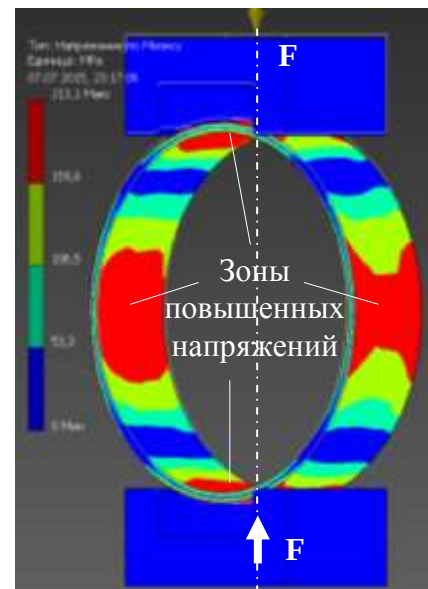
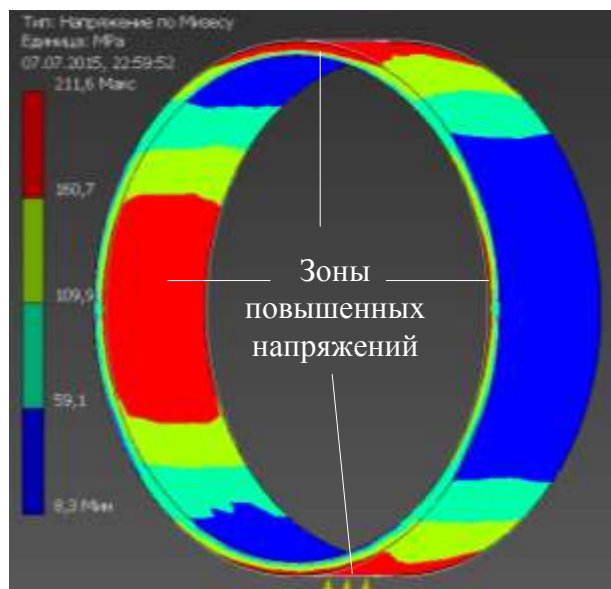
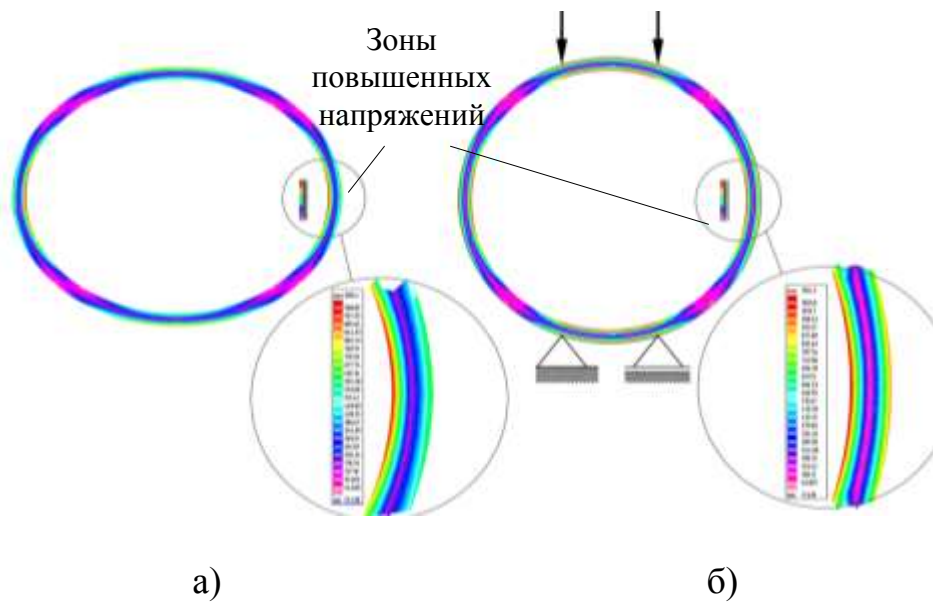
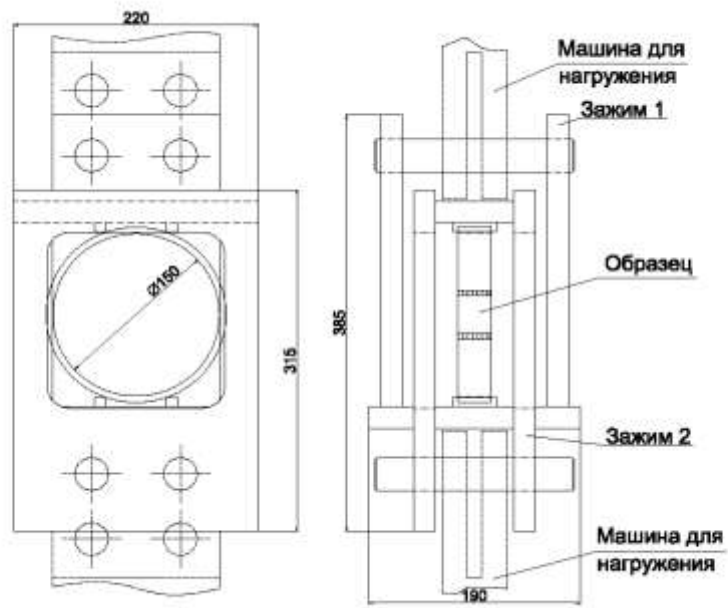


Рисунок 4.2. Распределение напряжений в кольцевом образце:

а, в – под действием равномерно распределенной рабочей нагрузки по наружной поверхности кольца, имеющего начальную эллиптичность, б, г – схема нагружения кольцевого образца и распределение напряжений в нем при предложенном одноосном тестовом нагружении (нагрузка передается по четырем линиям от нагружающего устройства).



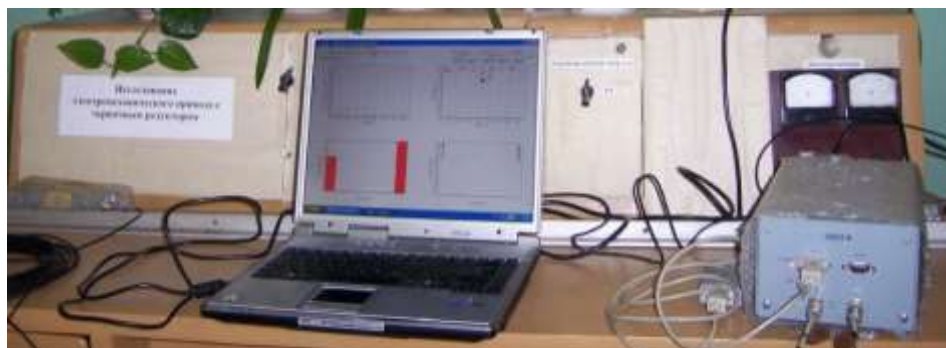
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3. Схема (а), внешний вид установки при испытании (б), образцы (в) и акустико-эмиссионная диагностическая система (г).

характеристики системы: рабочий диапазон частот $20 \div 1000$ кГц; коэффициент усиления предварительного усилителя 34 ± 1 дБ, диапазон изменения программируемого коэффициента усиления основного усилителя от минус 20 до 40 дБ с шагом 0,375 дБ; программно-управляемый порог дискриминации; использовались преобразователи с диапазоном частот 20-200 кГц. Первичные измеряемые параметры: время прихода сигнала АЭ с начала испытания, время нарастания сигнала, длительность сигнала, число выбросов сигнала, амплитуда импульсов, энергия импульса. В процессе эксперимента рассчитывался коэффициент временного перекрытия $K_{\text{пер}}$ сигналов, дисперсия и среднеквадратичное отклонение амплитуды.

Для анализа результатов регистрации применено компьютерное имитационное моделирование, позволяющее исследовать степень прочностной неоднородности образцов по методике, описанной в [24,39,89]. Моделирование заключалось в имитации на ЭВМ значений накапливаемой в материале концентрации микротрещин. Моделирование и сравнение результатов имитации с числом импульсов при различных состояниях материала и условиях его диагностического нагружения, производилось с помощью оригинальной программы Destruction Modeling, написанной в среде Delphi 7. При моделировании рассматривался вариант равномерного диагностического нагружения с постоянной скоростью изменения напряжений. Модель временной зависимости концентрации микротрещин при этом имела вид [24]

$$\begin{aligned}
 C(t) &= C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \psi(\bar{\omega}) \{1 - \exp[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta(\omega(\bar{t}))}]\} d\bar{\omega} = \\
 &= C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \psi(\bar{\omega}) \{1 - \exp[-\frac{1}{\tau_0} \int_0^t \exp(\bar{\omega}\bar{t} - \frac{U_0}{KT}) d\bar{t}]\} d\bar{\omega} = \\
 &= \left[\int_0^t \exp[\bar{\omega}\bar{t} - \frac{U_0}{KT}] d\bar{t} = \frac{1}{\bar{\omega}} \exp[\bar{\omega}\bar{t} - \frac{U_0}{KT}] \Big|_0^t = \frac{1}{\bar{\omega}} \exp[\frac{U_0}{KT}] (\exp[\bar{\omega}t] - 1) \right] =
 \end{aligned}$$

$$= C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \psi(\bar{\omega}) \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1 - \exp[\bar{\omega}t]}{\tau_0 \bar{\omega} \exp[U_0/KT]} \right] \right\} d\bar{\omega} \quad (4.1)$$

В качестве функций $\psi(\omega)$ распределения параметра состояния ω были выбраны следующие функции плотности:

- равномерное распределение

$$\psi(\omega, \omega_0, \Delta\omega) = \frac{1}{\Delta\omega}, \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \Delta\omega], \quad (4.2)$$

- логарифмически-нормальное с функцией плотности

$$\psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_3^2} (\ln(\omega) - \mu)^2 \right] \quad (4.3)$$

- двух-прямоугольное с весами $0.99 \div 0,999$ и $0.01 \div 0,001$

$$\psi(\omega, \omega_0, \omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 0.99/\omega_1, \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \omega_1] \\ 0.01/\omega_2, \omega \in (\omega_0 + \omega_1, \omega_0 + \omega_1 + \omega_2] \end{cases} \quad (4.4)$$

Результаты регистрации АЭ, в совокупности с неизменностью объема образца и порогов дискриминации аппаратуры АЭ говорили о стабильности значений акустико-эмиссионного коэффициента, корректности испытаний и приемлемости допущения

$$N_{\tau^*} = k_{AE} C^* = k_{AE} 0.01 C_0 \Rightarrow k_{AE} C_0 = 100 N_{\tau^*}, \quad (4.5)$$

где N_{τ^*} – последний элемент массива, соответствующий суммарному числу импульсов АЭ полученный на момент разрушения τ^* исследуемого образца.

Нахождение параметров модели (4.1) производилось на основе минимизации расхождения результатов моделирования с результатами регистрации АЭ:

$$\sum_{t=t_0}^{\tau^*} (N_t - k_{AE} C(t))^2 \rightarrow \min \quad (4.6)$$

которая, учитывая соотношение (4.5) для модели (4.1) будет иметь вид:

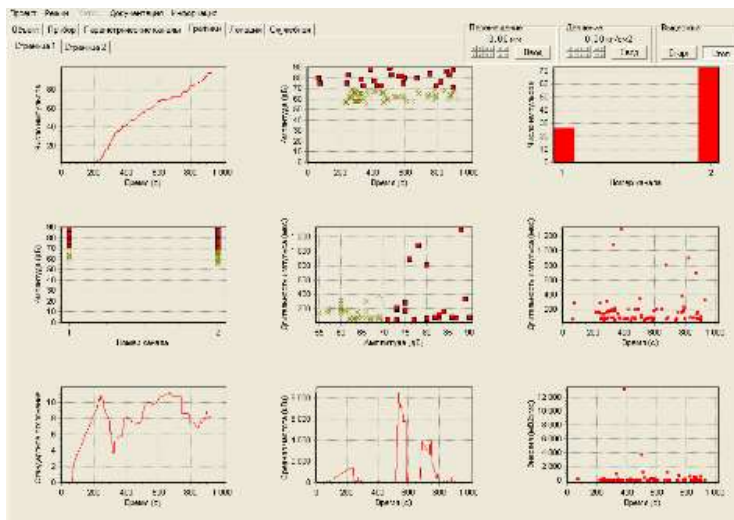
$$\sum_{t=t_0}^{\tau^*} \left(N_t - 100 N_{\tau^*} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \psi(\bar{\omega}) \{1 - \exp[\frac{1 - \exp(\bar{\omega}t)}{\tau_0 \bar{\omega} \exp(U_0 / KT)}]\} d\bar{\omega} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4.7)$$

где N_t – элементы массива данных, соответствующие суммарному количеству АЭ-сигналов полученных на момент времени t .

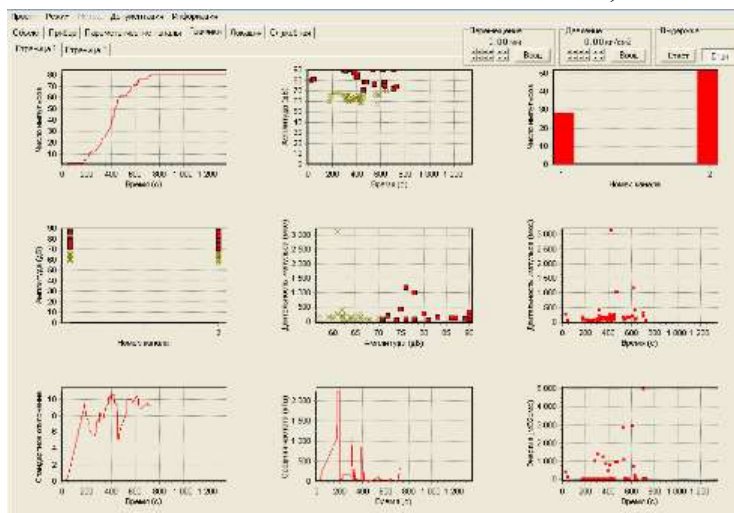
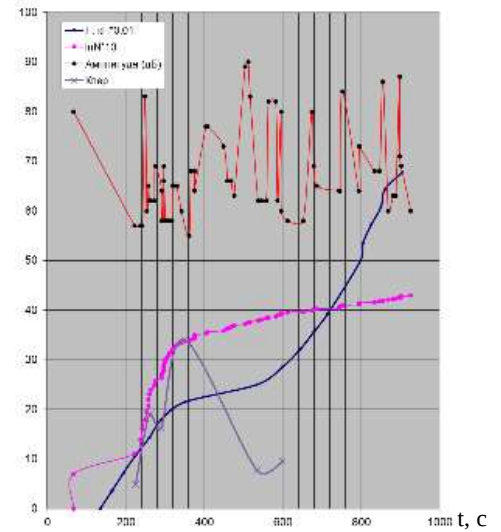
4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований.

Результаты регистрации первичных параметров сигналов АЭ в графическом виде представлены на рисунках 4.4, 4.5. Сопоставление результатов имитационного моделирования процесса разрушения с результатами регистрации сигналов АЭ представлены на рисунках 4.6-4.10. Построение временных зависимостей рассчитываемых параметров повреждаемости S производилась для различных значений параметров функций $\psi(\omega)$ при различных режимах нагружения. При этом модели $C(t)$ рассматривались на интервале от 0 до точки достижения концентрации C^* . При имитации АЭ использовались следующие значения постоянных: $\tau_0 = 10^{-14}$ с, $U_0 = 113000$ Дж/моль, $K = 8.31$ КДж/(Кмоль*град), $T = 275$ К, $C_0 = 10000$.

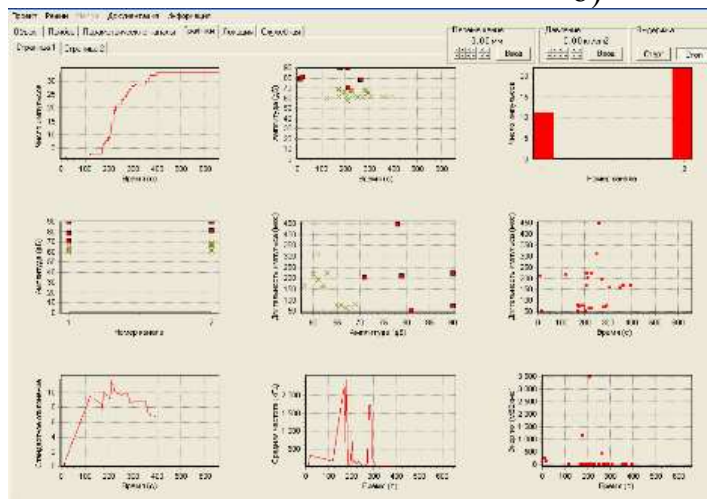
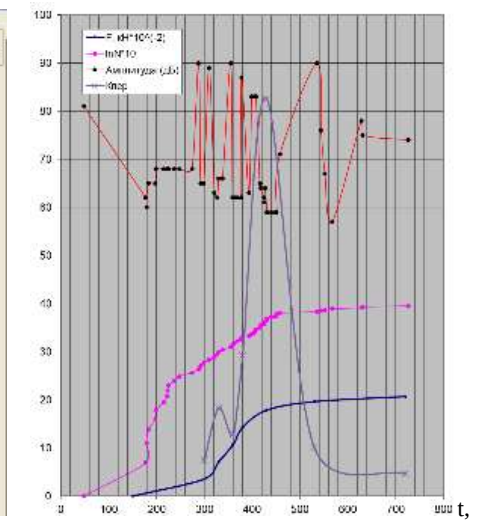
Результаты сопоставления показывают удовлетворительное совпадение, что подтверждает адекватность моделирования и корректность проведённых акустико-эмиссионных наблюдений. Таким образом, добиваясь выполнения условия (4.6), возможно исследование влияния структурных факторов на степень прочностной неоднородности материала колец.



а)



б)



в)

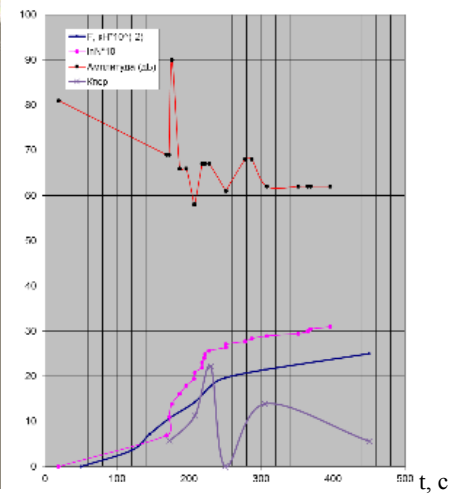
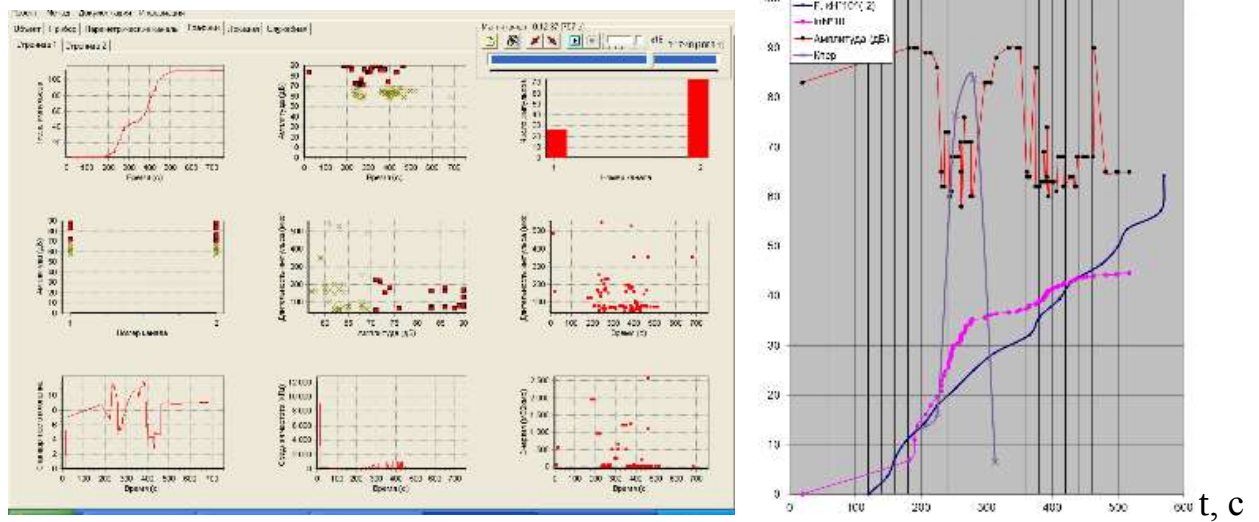
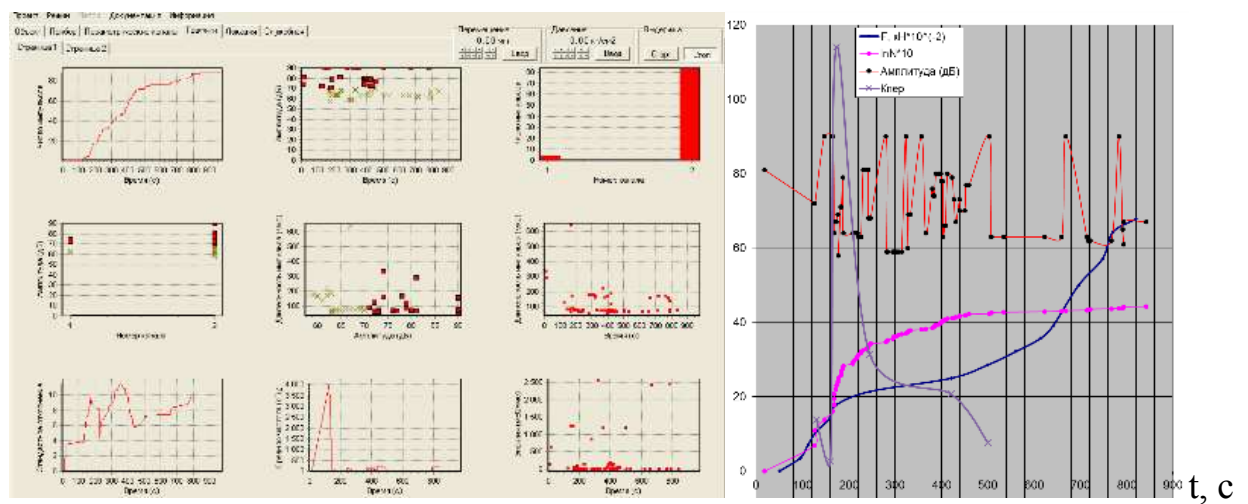
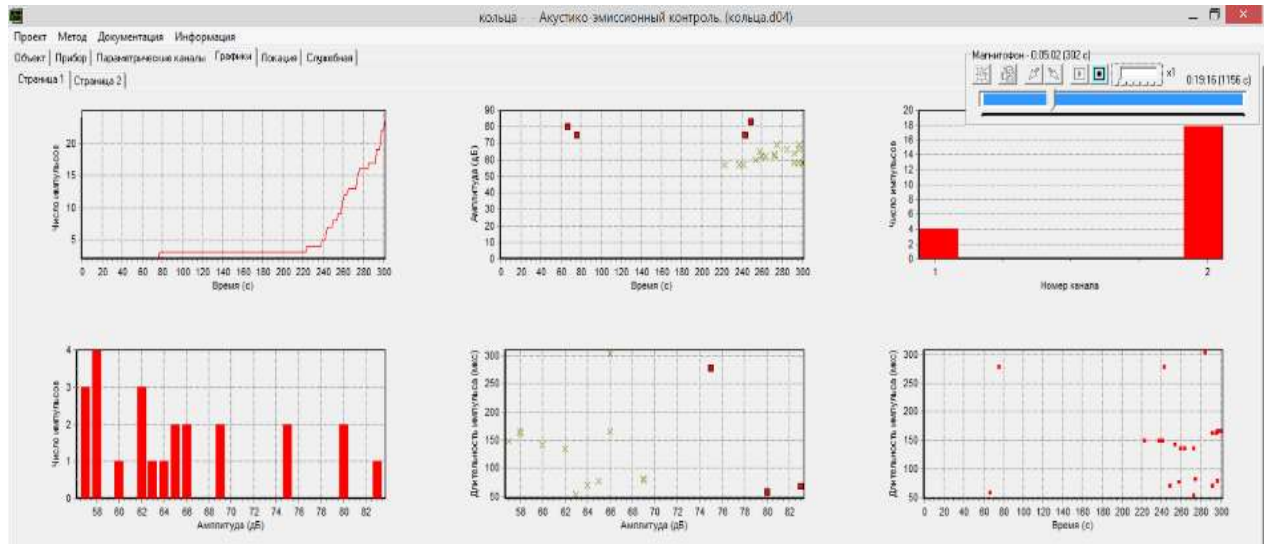


Рисунок 4.4. Экспериментальные данные по АЭ испытанию сваренных встык колец в процессе их нагружения радиальной сжимающей нагрузкой.
а)-образца № 1, б)-образца № 2, в)-образца № 3.

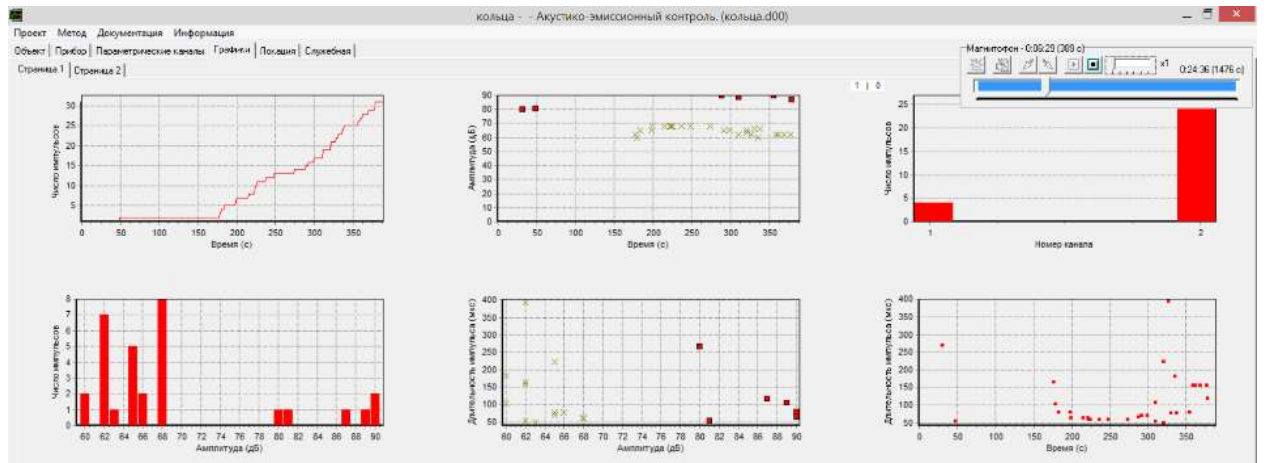
 $\Gamma)$ 

Д)

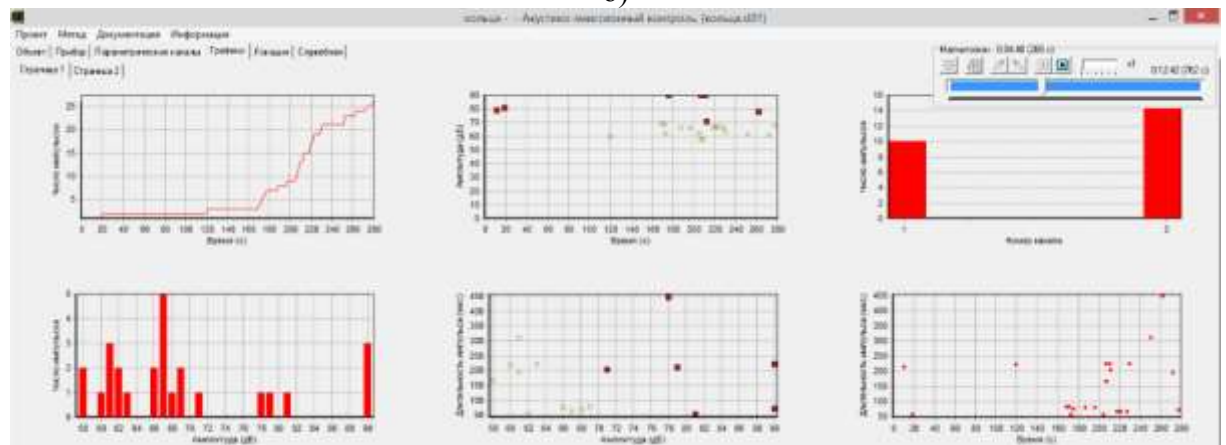
Рисунок 4.4. Экспериментальные данные по АЭ испытанию сваренных встык колец в процессе их нагружения радиальной сжимающей нагрузкой.
(продолжение). г)-образца № 4, д)-образца № 5.



а)

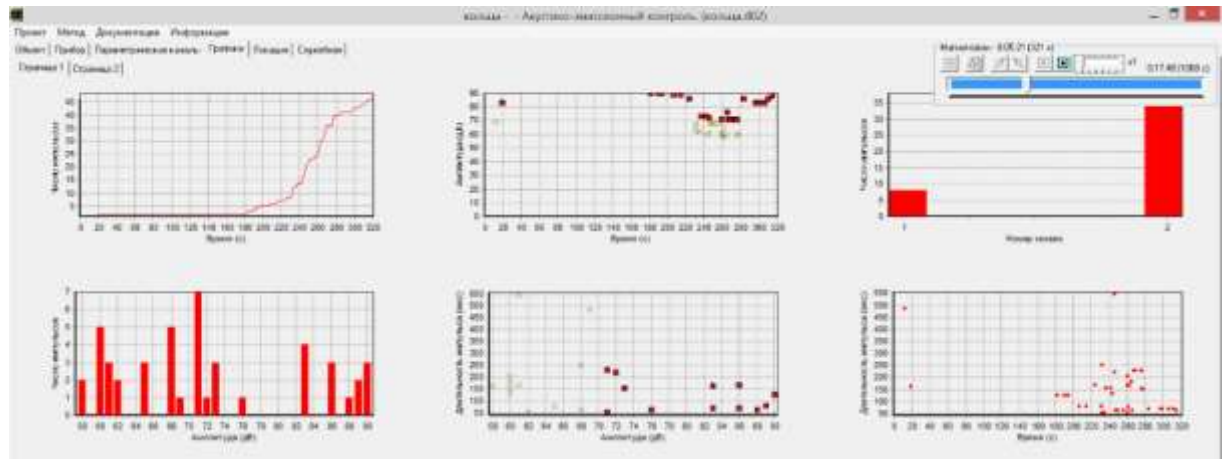


б)

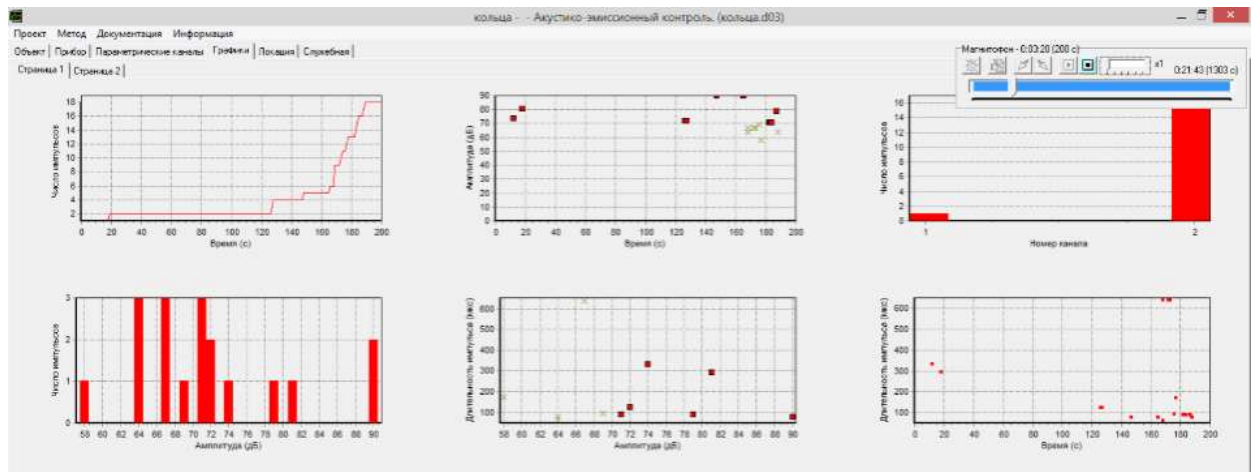


в)

Рисунок 4.5. Экспериментальные данные по АЭ испытанию сваренных встык колец на этапе их упругого нагружения радиальной сжимающей нагрузкой. а)-образца № 1, б)-образца № 2, в)-образца № 3.

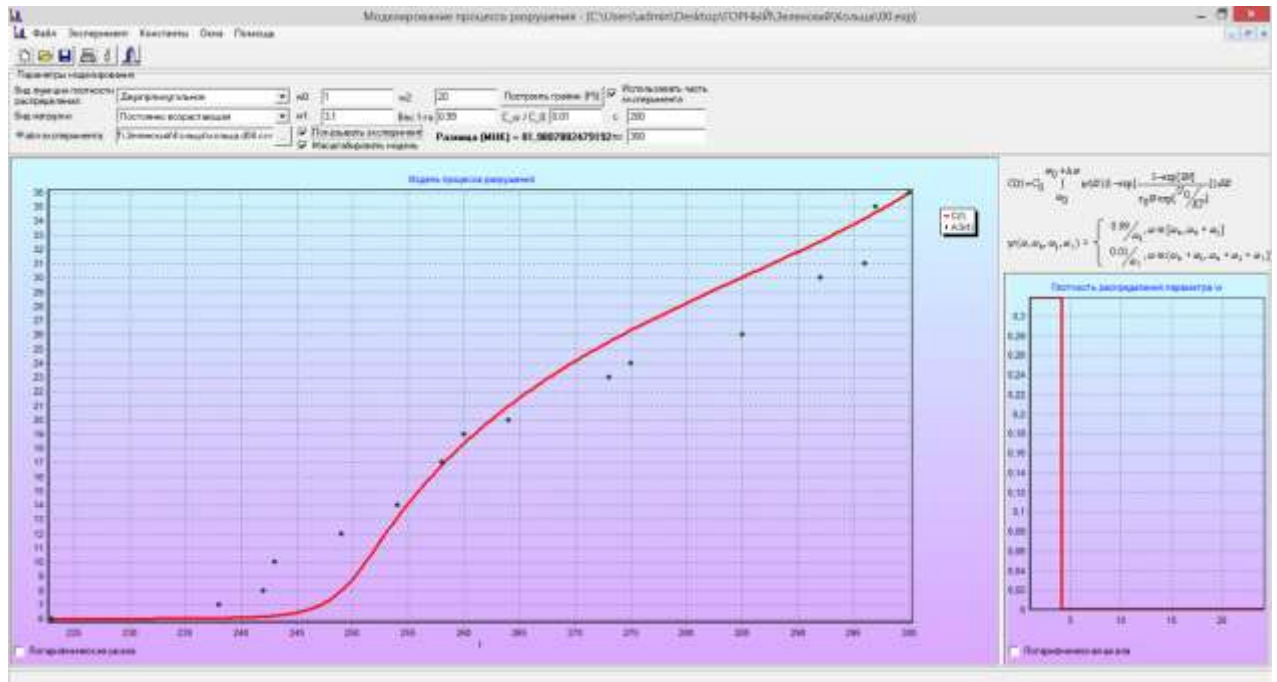


г)

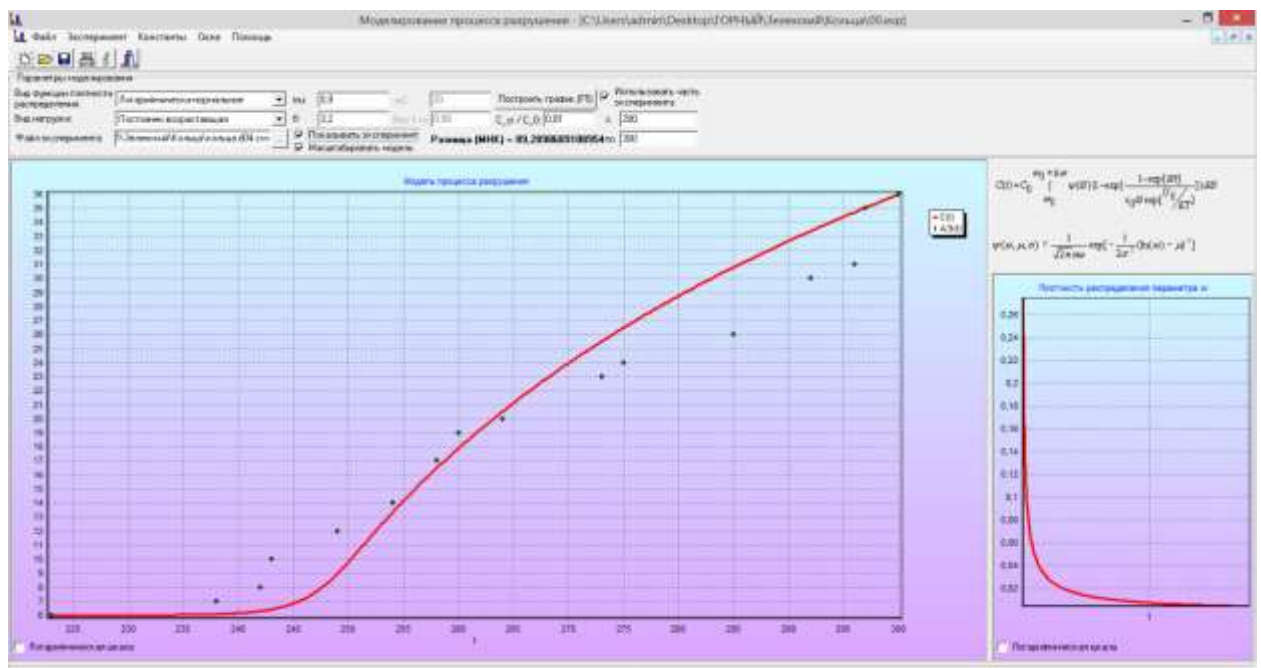


д)

Рисунок 4.5. Экспериментальные данные по АЭ испытанию сваренных встык колец на этапе их упругого нагружения радиальной сжимающей нагрузкой (продолжение). г)-образца № 4, д)-образца № 5.

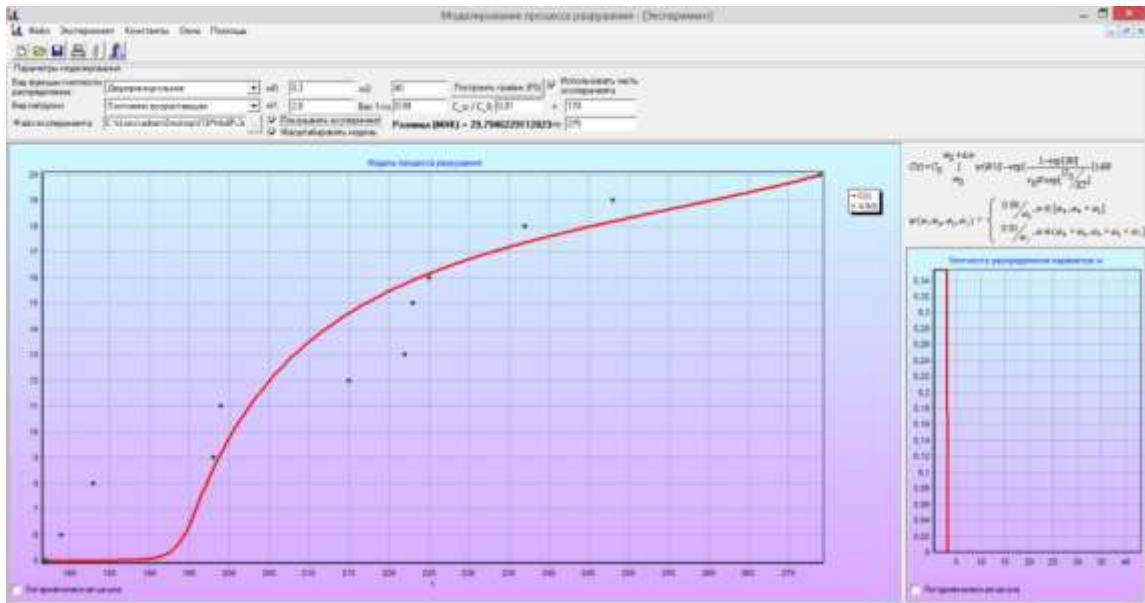


а)

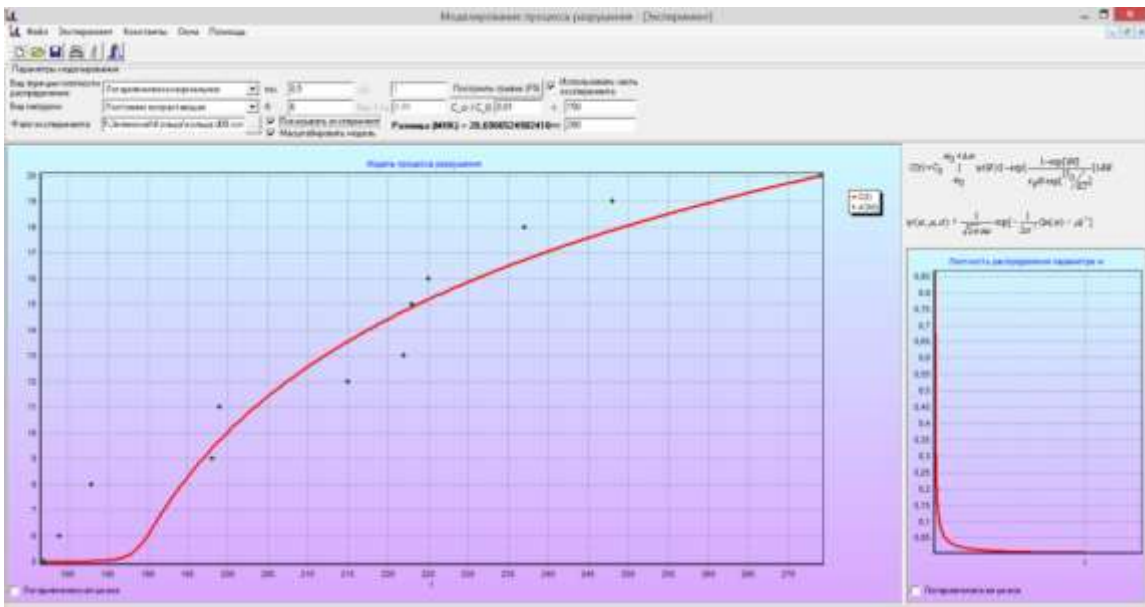


б)

Рисунок 4.6. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца №1 с результатами имитационного моделирования $\omega_2 > 6\omega_1$, $\omega_1 > 3\omega_0$, $\sigma_3 > 3\mu$, $\omega_2/\omega_1 = 6,45$, $\omega_1/\omega_0 = 3,1$, $\sigma_3/\mu = 3,56$. а)- двух прямоугольное распределение $\psi(\omega)$, б)- логарифмически нормальное распределение $\psi(\omega)$.



а)

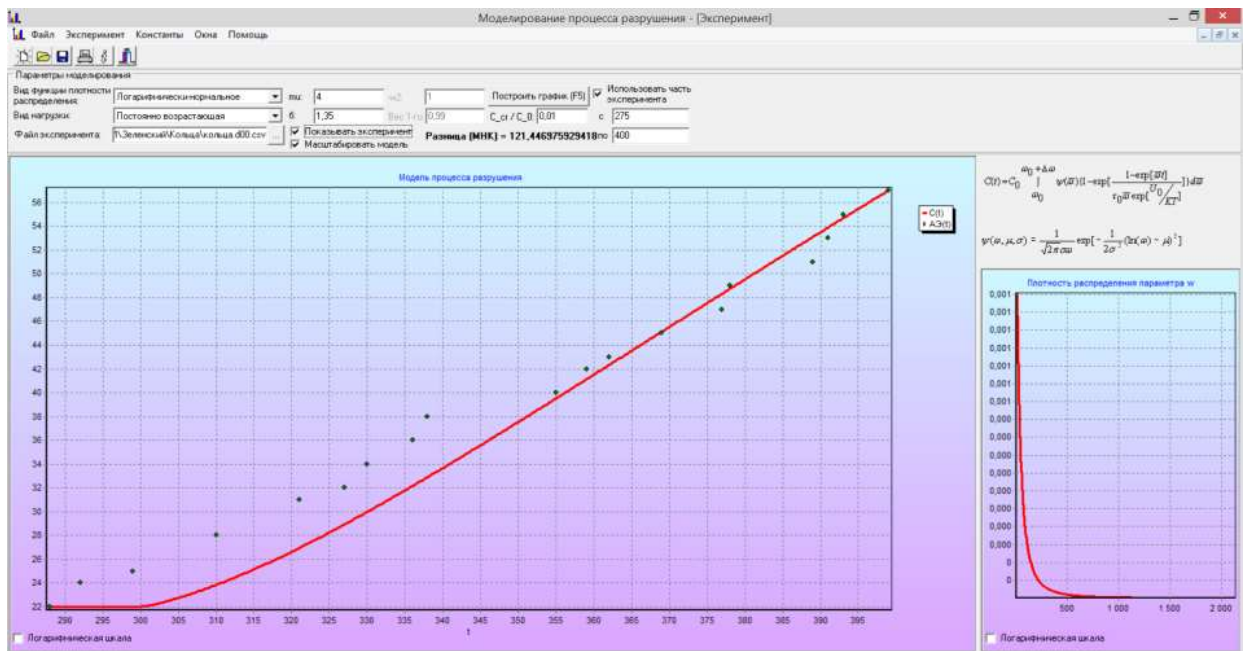


б)

Рисунок 4.7. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца

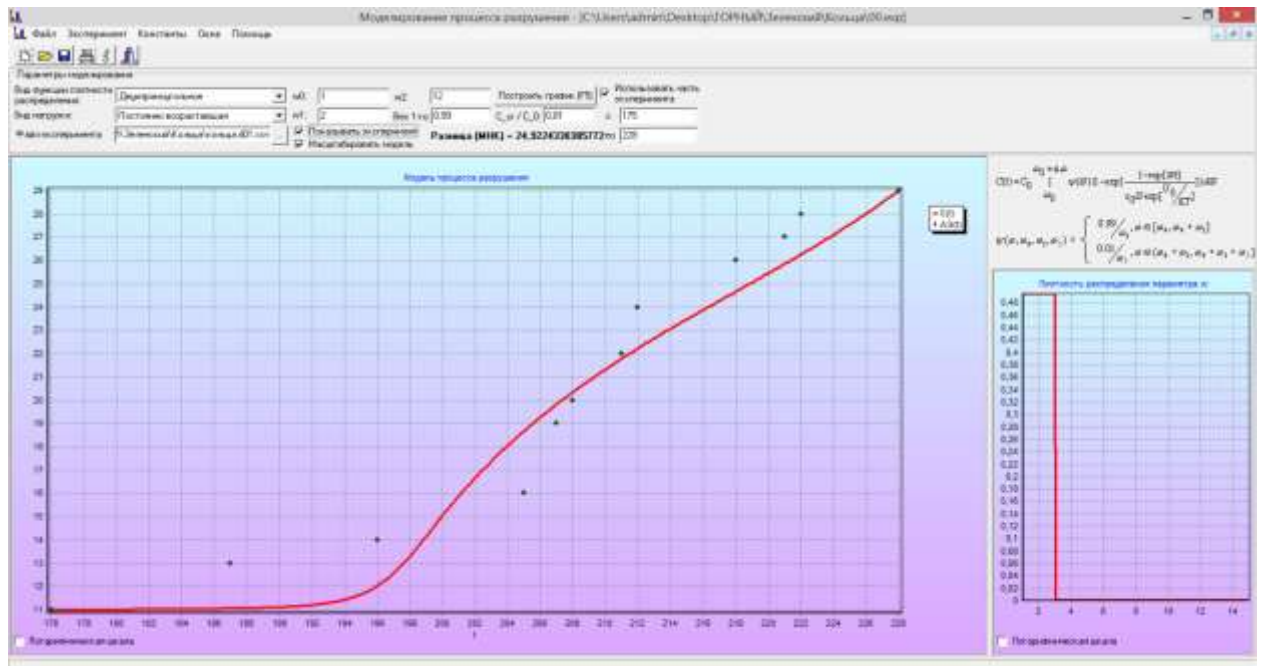
№ 2, выполненного без дефектов, с результатами имитационного моделирования. Разрушение до 275 секунды высоко неоднородное (а,б)

$$\omega_2 > 10\omega_1, \omega_1 > 9\omega_0, \sigma_3 > 10\mu, \omega_2/\omega_1 = 14,29, \omega_1/\omega_0 = 9,3, \sigma_3/\mu = 12$$

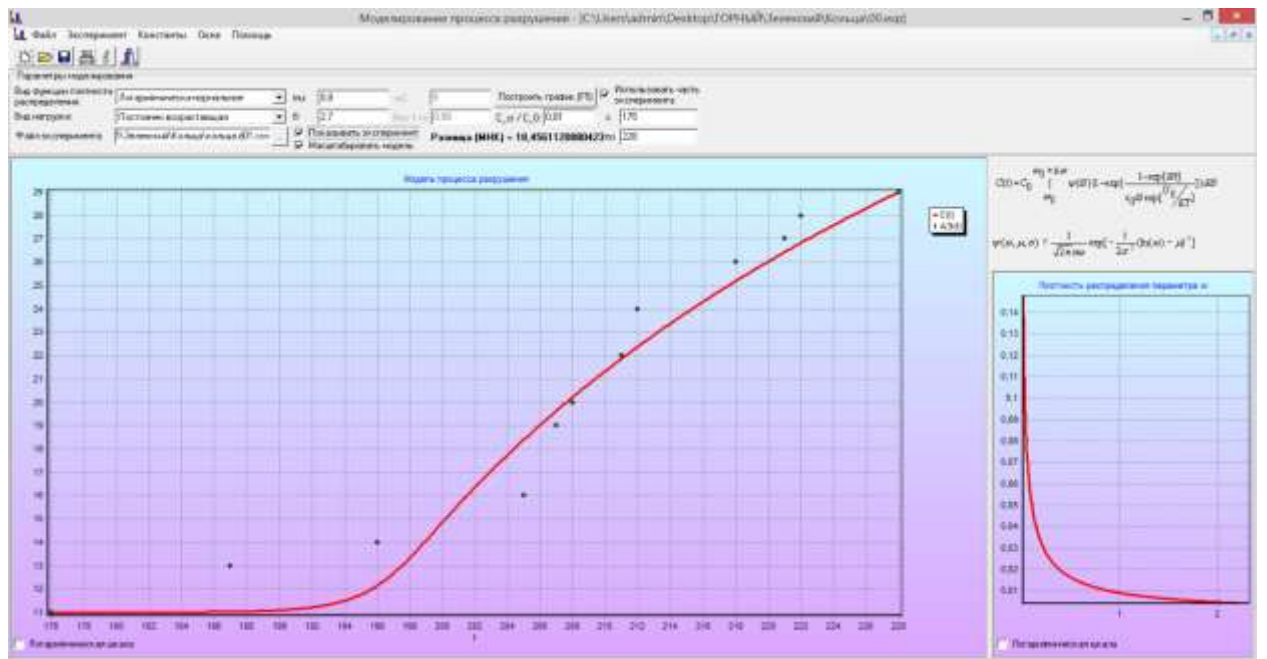


в)

Рисунок 4.7. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца № 2, выполненного без дефектов, с результатами имитационного моделирования (продолжение). в- разрушение после 275 секунды и до 380 с-однородное ($\sigma_3 < \mu$, $\sigma_3/\mu = 0,34$)

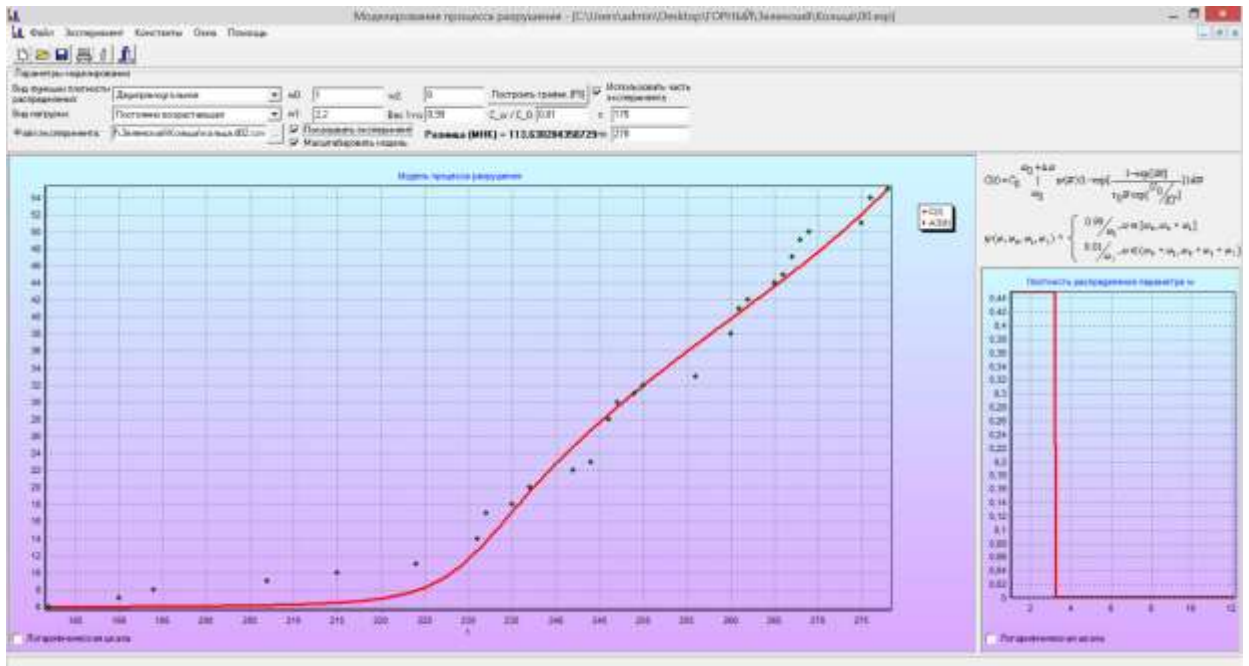


а)

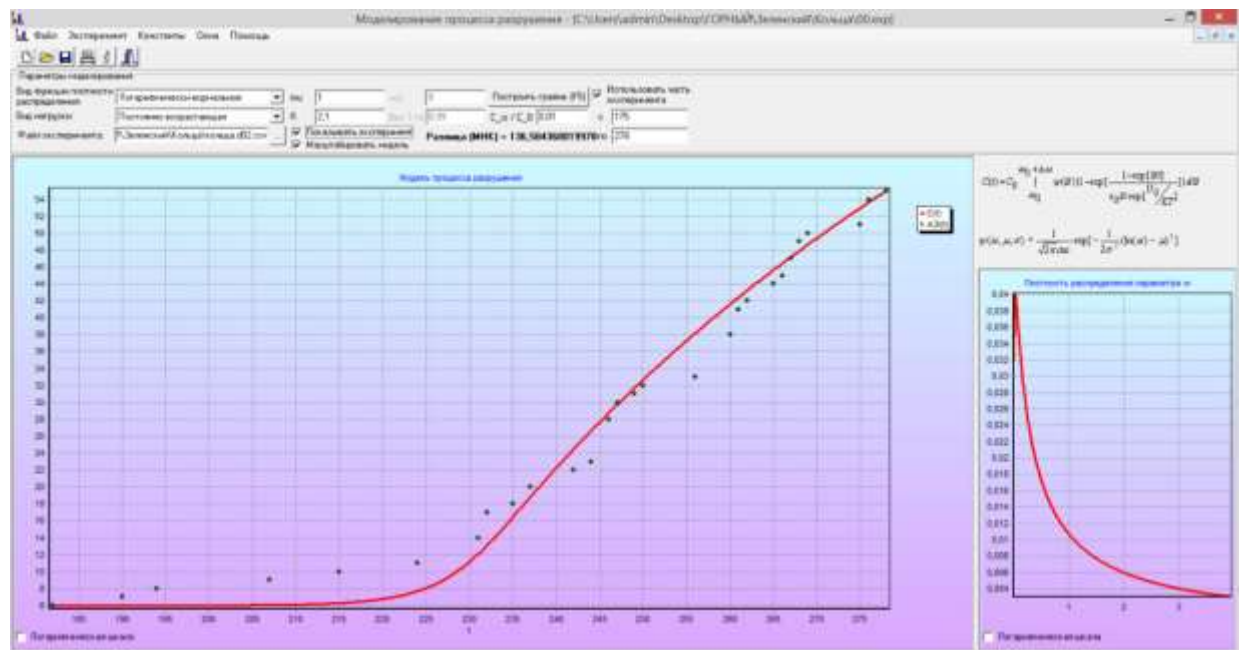


б)

Рисунок 4.8. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца №3 с результатами имитационного моделирования: а) $\omega_2 > 5\omega_1$, $\omega_1 > \omega_0$, $\omega_2/\omega_1=6$, $\omega_1/\omega_0=2$; б) $\sigma_3 > 3\mu$, $\sigma_3/\mu=3,375$.

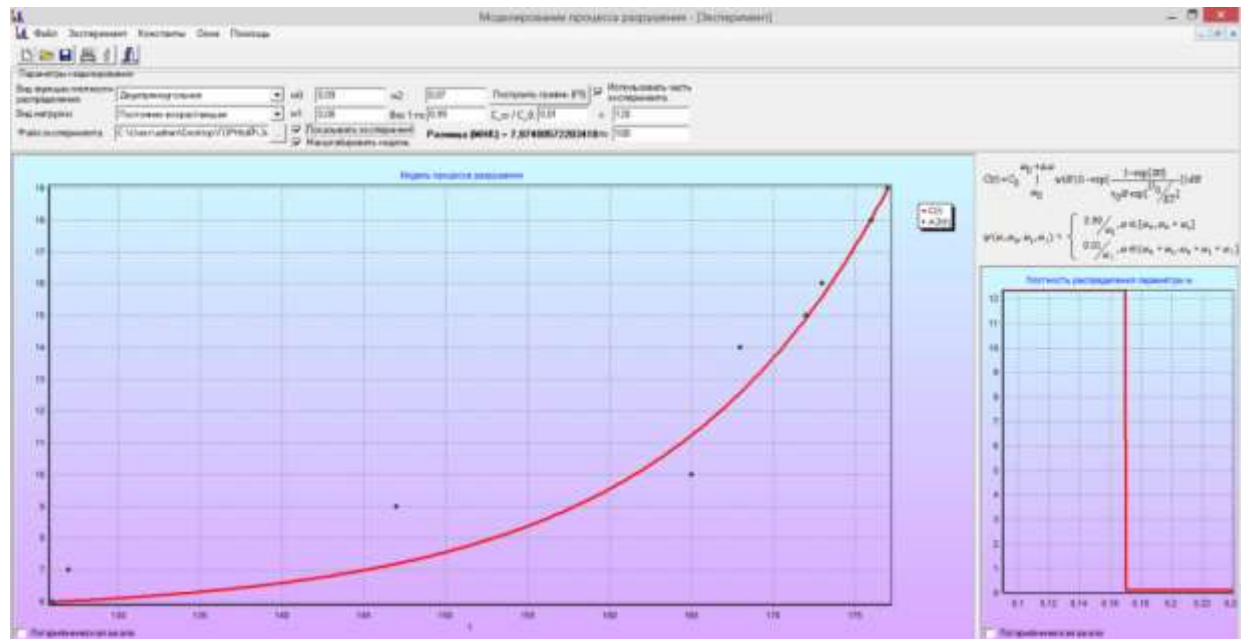


а)

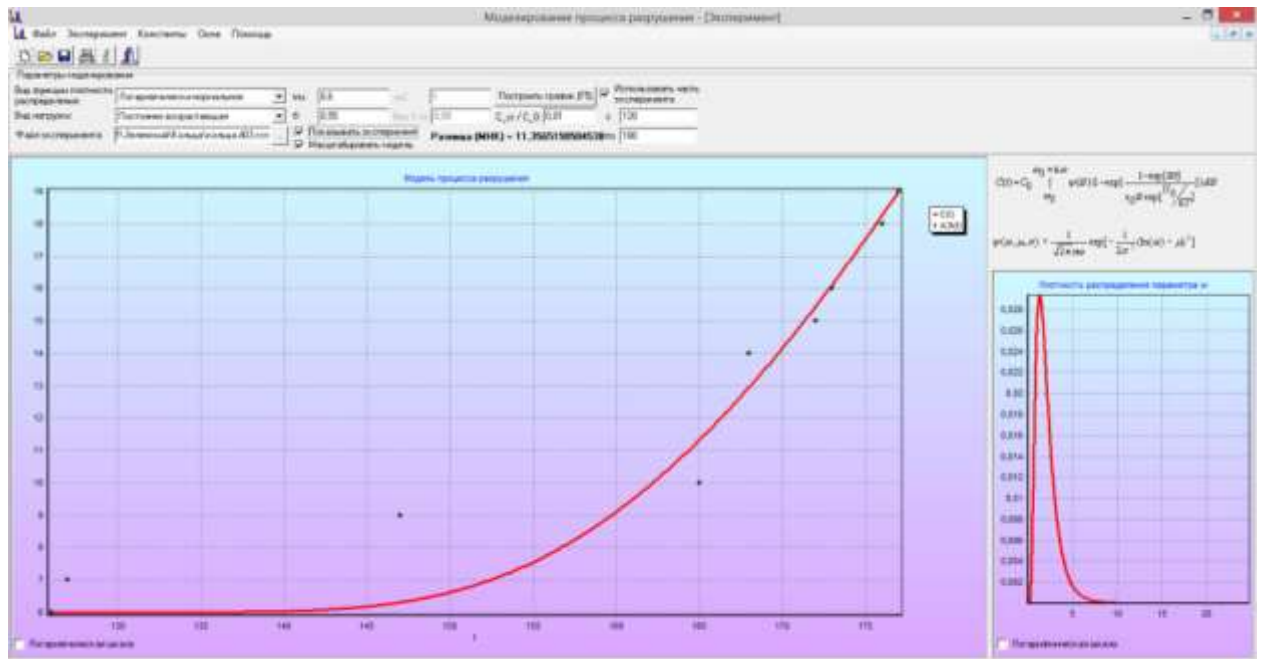


б)

Рисунок 4.9. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца № 4 с результатами имитационного моделирования: а) $\omega_2 > 4 \omega_1$, $\omega_1 > 2 \omega_0$, $\omega_2 / \omega_1 = 4,1$, $\omega_1 / \omega_0 = 2,2$, б) $\sigma_3 > 2\mu$, $\sigma_3 / \mu = 2,1$



а)



б)

Рисунок 4.10. Сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца №5 с результатами имитационного моделирования:

а) $\omega_2 < \omega_1$, $\omega_1 < \omega_0$, $\omega_2 / \omega_1 = 0,875$, $\omega_1 / \omega_0 = 0,89$ б) $\sigma_3 < \mu$, $\sigma_3 / \mu = 0,92$,
разрушение однородное.

4.3. Акустико-эмиссионный контроль степени опасности дефектов сжимаемых кольцевых образцов сварных соединений

По полученным данным были построены графики изменения нагрузки и логарифма числа импульсов АЭ от времени, по формулам таблицы 2.2 на участке 3 (рисунок 4.11) упругого кинетически однородного разрушения неразрушающим путём определён параметр X_{AE} и связываемые с ресурсом Y_{AE} и W_{AE} (рисунок 4.12). Соответствующая рабочим напряжениям и необходимая для расчёта величины W_{AE} по формуле

$$W_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / d K_H = \omega_{\text{раб}},$$

где $K_H = F / F_{\text{раб}}$ - коэффициент нагрузки, $\omega_{\text{раб}}$ - усреднённое значение параметра прочностного состояния структурных элементов при рабочих напряжения, величина нагрузки диагностического нагружения $F_{\text{раб}}$ рассчитана для данных образцов с применением программы Autodesk Inventor Professional со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ ANSYS Design Space [177] для максимально допустимых рабочих напряжений $\sigma_{\text{раб}}$, определяющих (по формуле Лапласа) допустимое гидростатическое давление и рабочую глубину погружения

$$\sigma_{\text{раб}} = \sigma_T / n = 215 \text{ МПа} / 1,4 = 153 \text{ МПа},$$

где $\sigma_T = 215 \text{ МПа}$ - предел текучести материала корпуса, $n = 1,4$ - коэффициент запаса прочности. Расчётное значение $F_{\text{раб}} = 1310 \text{ Н}$.

В таблицах 4.1, 4.2 приведены корреляции между значениями различных показателей, рекомендованных ПБ 03-593-03-число импульсов, амплитуда, энергия (MARSE), локально-динамический критерий m и оптимальных концентрационно-кинетических показателей X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} , а также параметров (4.3), (4.4) функции $\psi(\omega)$ со значениями максимальных напряжений σ_{max} вблизи искусственных дефектов с учётом их размеров, рассчитанными на основе МКЭ (рисунок 4.13), и площади A снятой поверхности сварного шва.

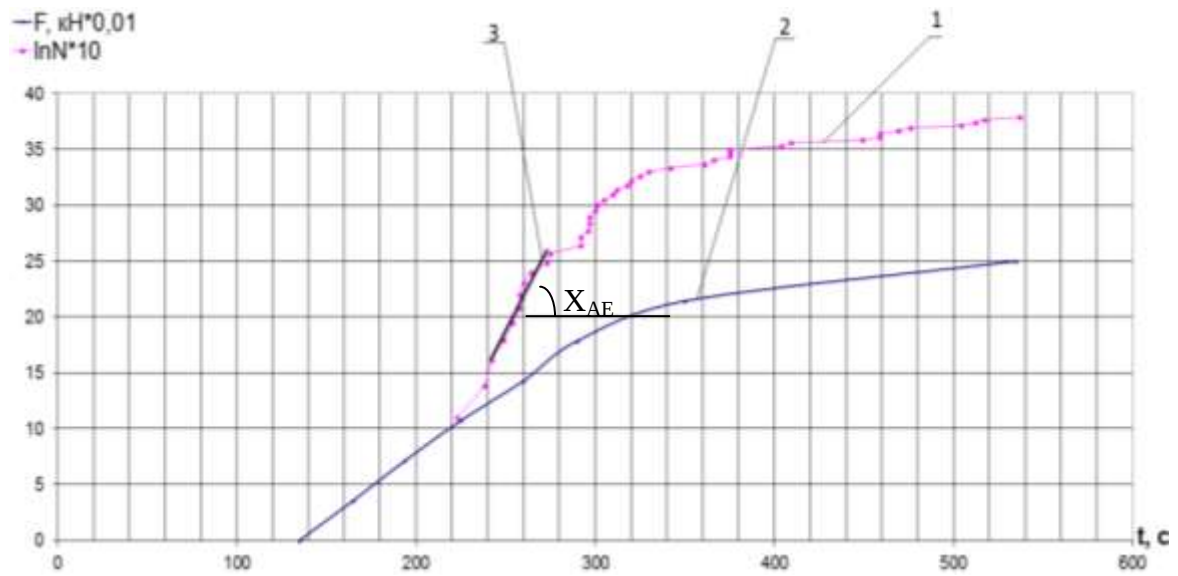
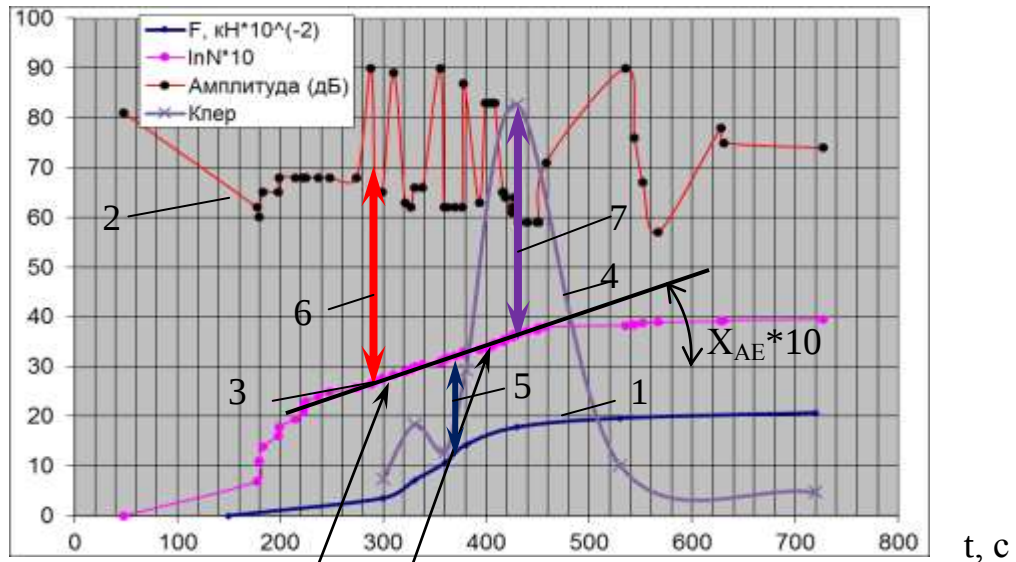


Рисунок 4.11. Анализ данных, полученных из эксперимента при испытании образца № 1.

1 – зависимость логарифма числа N_{Σ} импульсов АЭ от времени t , 2 – нагрузки от времени, 3 – участок упругого кинетически однородного разрушения



$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \exp[(\gamma \sigma t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \sigma)$$

t	N	lnN	lnN*10	F, H	$\sigma_{вн}$ (МПа), МПа	$\sigma_{нар}$ (МПа), МПа	$\sigma_{ср}$ (МПа), МПа
48	1	0,000	0,000				
177	2	0,693	6,931				
179	3	1,099	10,986				
183	4	1,386	13,863				
198	5	1,609	16,094				
199	6	1,792	17,918				
215	7	1,946	19,459				
222	8	2,079	20,794				
223	9	2,197	21,972				
225	10	2,303	23,026				
237	11	2,398	23,979				
248	12	2,485	24,849				
274	13	2,565	25,649				
288	14	2,639	26,391				
292	15	2,708	27,081				
299	16	2,773	27,726				
310	17	2,833	28,332	476,000	46,220	38,260	42,240
321	18	2,880	28,904				
327	19	2,944	29,444				
330	20	2,996	29,957				
338	21	3,045	30,445				
355	22	3,091	30,910				
359	23	3,135	31,355				
362	24	3,178	31,781				
369	25	3,219	32,189				
377	26	3,258	32,587				
378	27	3,296	32,968				
393	28	3,332	33,322				
399	29	3,367	33,673				
404	30	3,401	34,012				
406	31	3,434	34,340	1613,640	158,500	129,800	143,150
408	32	3,465	34,657				
416	33	3,497	34,965				
417	34	3,526	35,264				
418	35	3,555	35,553				
425	36	3,584	35,835				
425	37	3,611	36,109				

**Представительные
параметры**

$$X_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / dt, c^{-1}$$

$$k Y_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / d F, H^{-1}$$

$$F_{ном} = 1310 H$$

$$W_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / d K_n$$

$$Y_{AEвн} = d \ln N_{\Sigma} / d \sigma_{вн}, МПа^{-1}$$

$$Y_{AEнар} = d \ln N_{\Sigma} / d \sigma_{нар}, МПа^{-1}$$

$$Y_{AEср} = d \ln N_{\Sigma} / d \sigma_{ср}, МПа^{-1}$$

$$X_{AE} = (3,434 - 2,833) / (406 - 310) = 0,00626 (c^{-1})$$

$$k Y_{AE} = (3,434 - 2,833) / (1613,64 - 476) = 0,000528 (H^{-1})$$

$$W_{AE} = k Y_{AE} * F_{ном} = 0,000528 * 1310 = 0,691$$

$$Y_{AEср} = (3,434 - 2,833) / (143,15 - 42,24) = 0,00595 (МПа^{-1})$$

Рисунок 4.11 (продолжение). Анализ данных, полученных из эксперимента при испытании образца № 2. 1,2,3,4-временные зависимости нагрузки (1), амплитуды (2), числа импульсов (3) и коэффициента перекрытия (4) сигналов АЭ; 5,6,7- признаки временной фильтрации сигналов АЭ по упруго-пластичности (5), стабилизации амплитудной дисперсии (6) и повышению коэффициента перекрытия (7).

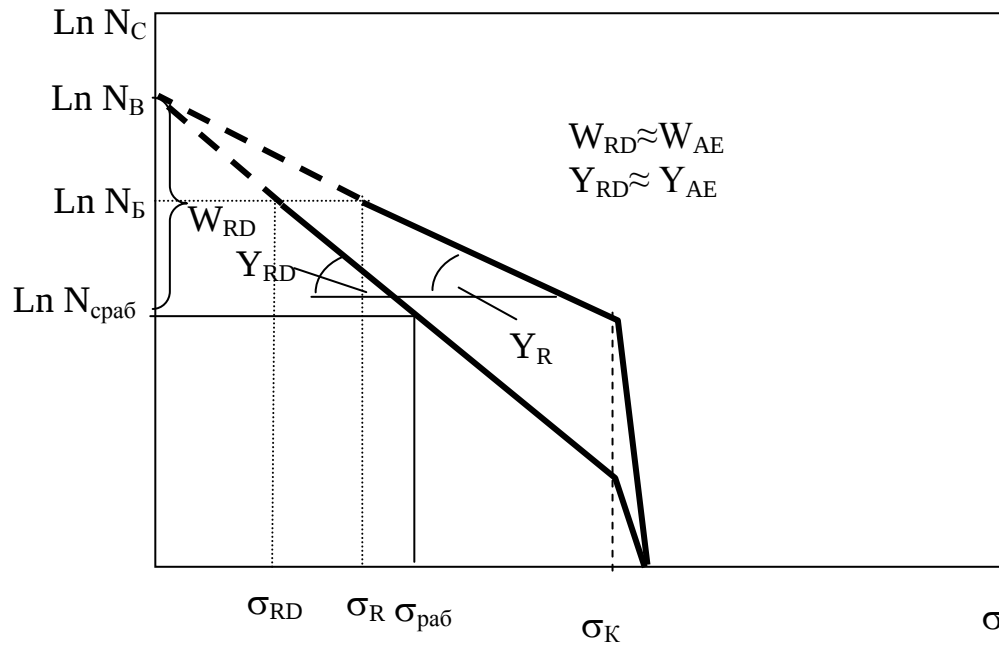


Рисунок 4.12. Кривая усталости и графическая интерпретация связи параметра W_{AE} с ресурсом

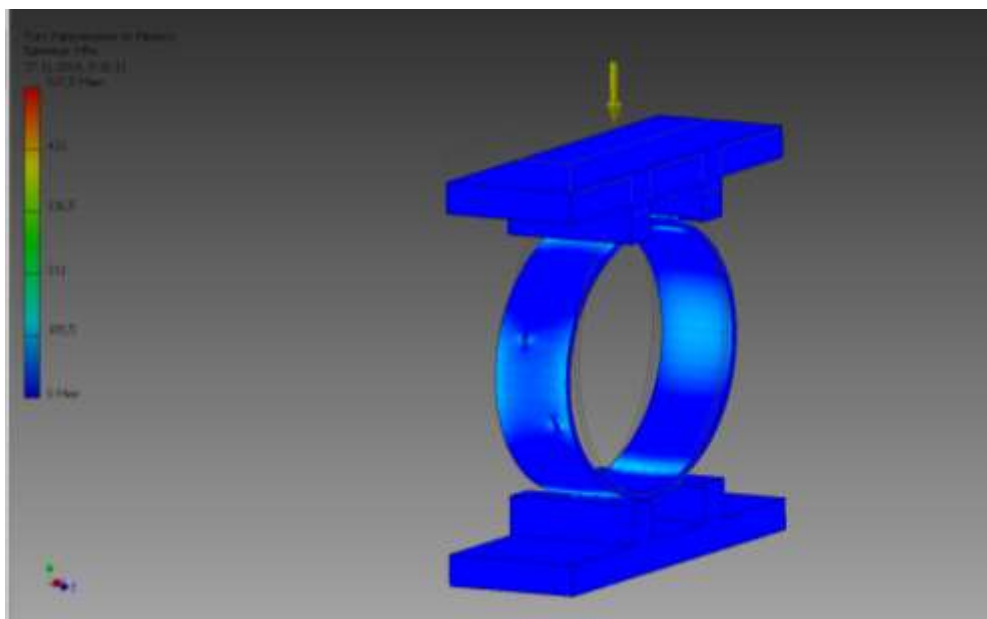
σ_{RD}, σ_R , -пределы выносливости реальной детали и эталонного образца, $\sigma_{рaб}$ - рабочие напряжения, σ_K - критическое напряжение, N_B -базовое число циклов, N_B -константа материала, $N_{срaб}$ - число циклов до разрушения (ресурс) реальной детали, $W_{RD}=\omega_{рaб}$ -параметр прочностного состояния реальной детали

Таблица 4.1. Анализ данных эксперимента

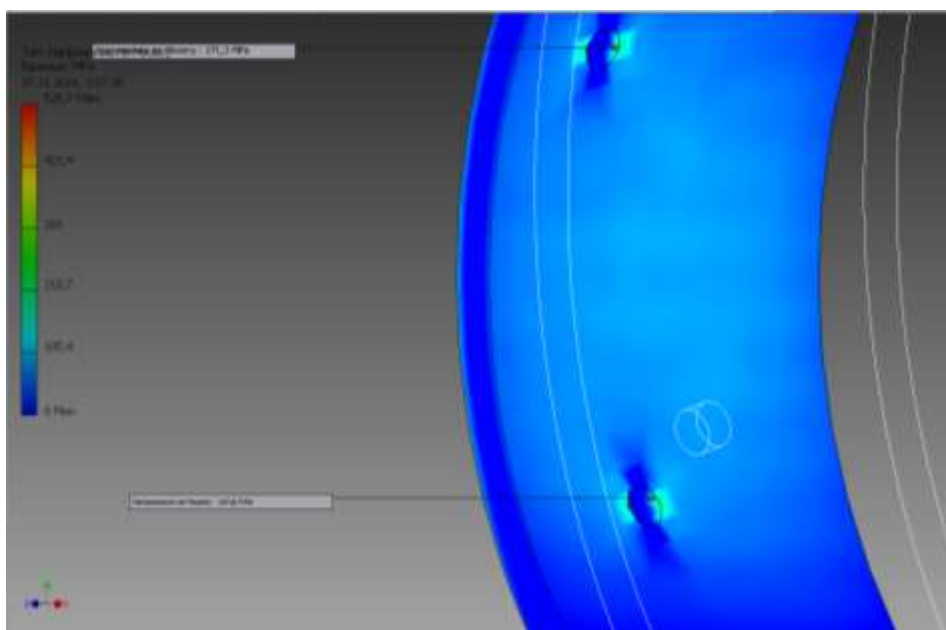
Номер образца	Дефекты образца	Суммарная энергия на этапе упругого нагружения	Число импульсов N на этапе упругого нагружения	Суммарная амплитуда A_{Σ} на этапе упругого нагружения, дБ	Локально-динамический показатель m (по участку однородного разрушения)	Концентрационно-кинетические показатели			Максимальные напряжения вблизи дефектов
		$MARSE, \text{МВ}^2 \cdot \text{хмс}$				$X_{AE}, 1/\text{с}$	$Y_{AE}, \text{МПа}^{-1}$	W_{AE}	$\sigma_{\max}, \text{МПа}$
5	2 не сквозных отверстия внутри: Ø4 мм и Ø3 мм	2734	12	851	5,86	0,036	0,038	4,39	268
4	2 не сквозных отверстия снаружи: Ø2,4 мм и Ø3,2 мм; свищ 1 мм	9244	33	2335	3,82	0,032	0,025	2, 84	247
1	2 сквозных отверстия Ø4 мм	275	17	1072	3,64	0,028	0,029	3,39	259
3	2 не сквозных отверстия: внутри Ø3,5 мм, снаружи Ø3 мм	1188	12	811	3,1	0,028	0,026	3,04	266
2	Без дефектов	4566	26	1787	0,49	0,006	0,006	0,69	188
Коэффициент корреляции со значениями $\sigma_{\max}$		-0,341	-0,58	-0,561	0,86	0,93	0,94	0,94	

Таблица 4.2. Анализ связи параметров функции $\psi(\omega)$ с площадью A снятой поверхности термически необработанного шва и величиной $\sigma_{\max}$ максимальных напряжений

Номер образца	Дефекты образца	σ_3/μ	ω_2/ω_1	ω_1/ω_0	площадь A снятой поверхности термически необработанного шва, мм ²	Максимальные напряжения вблизи дефектов $\sigma_{\max}$, МПа
5	2 не сквозных отверстия внутри: Ø4 мм и Ø3 мм	0,92	0,875	0,89	19,6	268
4	2 не сквозных отверстия снаружи: Ø2,4 мм и Ø3,2 мм; свищ 1 мм	2,1	4,1	2,2	9,48	247
1	2 сквозных отверстия Ø4 мм (заусенцы)	3,56	6,45	3,1	25	259
3	2 не сквозных отверстия: внутри Ø3,5 мм, снаружи Ø3 мм	3,375	6	2	16,7	266
2	Без дефектов	12	14,29	9,3	0	188
Коэффициент корреляции со значениями $\sigma_{\max}$		-0,95	-0,89	-0,97		
Коэффициент корреляции со значениями A		-0,75	-0,68	-0,76		



а)



б)

Рисунок 4.13. Анализ напряжений вблизи дефектов с помощью 3D-системы Autodesk Inventor Professional. а)-общая расчётная схема, б)-расчёт напряжений вблизи дефектов образца № 3.

Значения коэффициента корреляции между X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} и $\sigma_{\max}$ были максимальными и превышали 0,9, значения параметра Y_{AE} близки по величине к значениям Y_R , параметра кривой усталости близкой по составу стали 09Г2 (рисунок 4.14), бездефектный образец имел значение $W_{AE} < 1$, что подтверждает информативность диагностических параметров. Относительная погрешность оценки параметров X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} не превышает 20 %, числа же импульсов N в условиях помех при производственных испытаниях - 50-60%. Наряду со значениями коэффициентов корреляции, это позволило определить на порядок более высокую информативность концентрационно-кинетических параметров по сравнению с рекомендуемыми Правилами безопасности.

Учитывая связь значений коэффициента корреляции с количеством информации, получаемой при диагностировании (см. главу 3) можно утверждать, что информативность параметров X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} превышает информативность рекомендованных Правилами АЭ контроля [100] «стандартных» параметров MARSE, N и A_Σ (таблица 4.1), которые, к тому же, неадекватно связаны со степенью опасности дефектов (отрицательные значения коэффициента корреляции с расчётными напряжениями вблизи дефектов). Это объясняет сложившееся недоверие к методу АЭ со стороны эксплуатирующих трубопроводные аппараты организации и говорит об оптимизации технологии АЭ контроля прочности на основе применения концентрационно-кинетического критерия.

Данные таблицы 4.2 показывают высокую прочностную неоднородность бездефектного образца (наибольшие значения соотношений параметров функции $\psi(\omega)$) и перспективность использования микромеханической модели для исследования влияния прочностной неоднородности на функциональные свойства материала, диагностическую ценность параметров АЭ. Иллюстрация повышения гамма-процентного ресурса на основе повышения точности

его прогнозирования за счёт использования информативного диагностического параметра W_{AE} показана на рисунке 4.15.

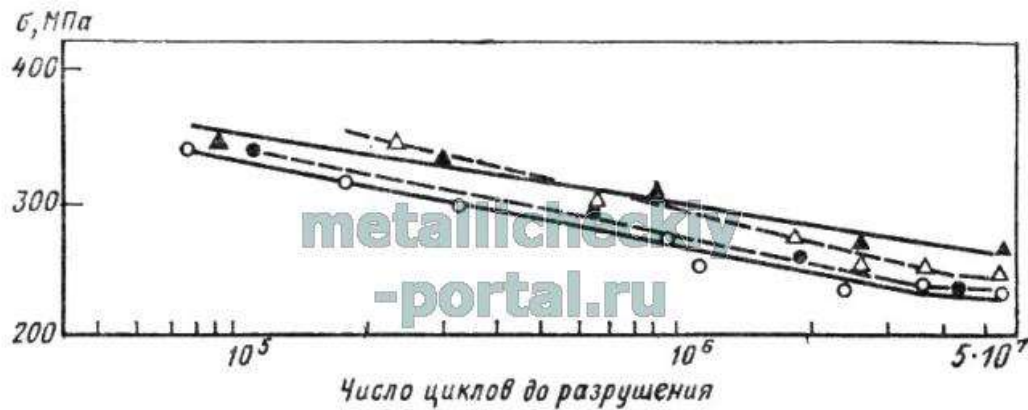
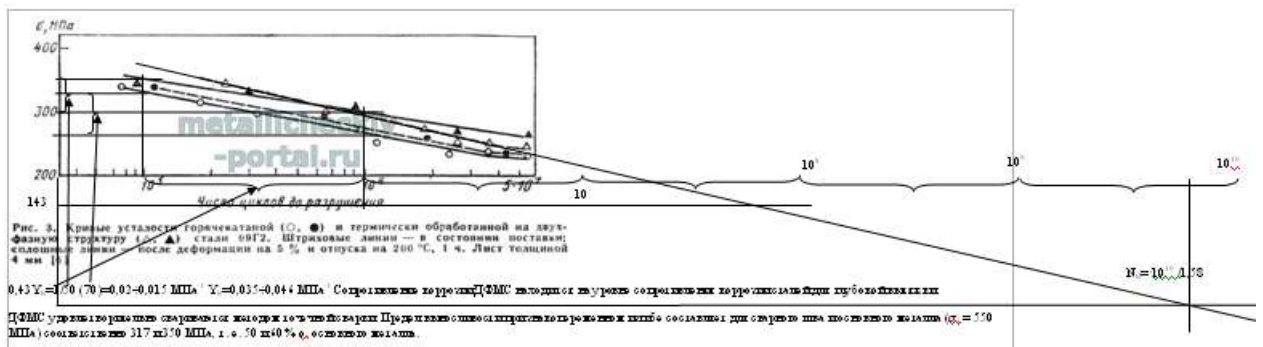


Рис. 3. Кривые усталости горячекатаной (○, ●) и термически обработанной на двухфазную структуру (△, ▲) стали 09Г2. Штриховые линии — в состоянии поставки; сплошные линии — после деформации на 5 % и отпуска на 200 °С, 1 ч. Лист толщиной 4 мм [6]

а)



б)

Рисунок 4.14. Кривые усталости стали 09Г2 (а) и определение значений угловых коэффициентов (б) $0,43 Y_R = 0,02 \dots 0,015 \text{ МПа}^{-1}$ $Y_R = 0,31 \dots 0,46 \text{ МПа}^{-1}$

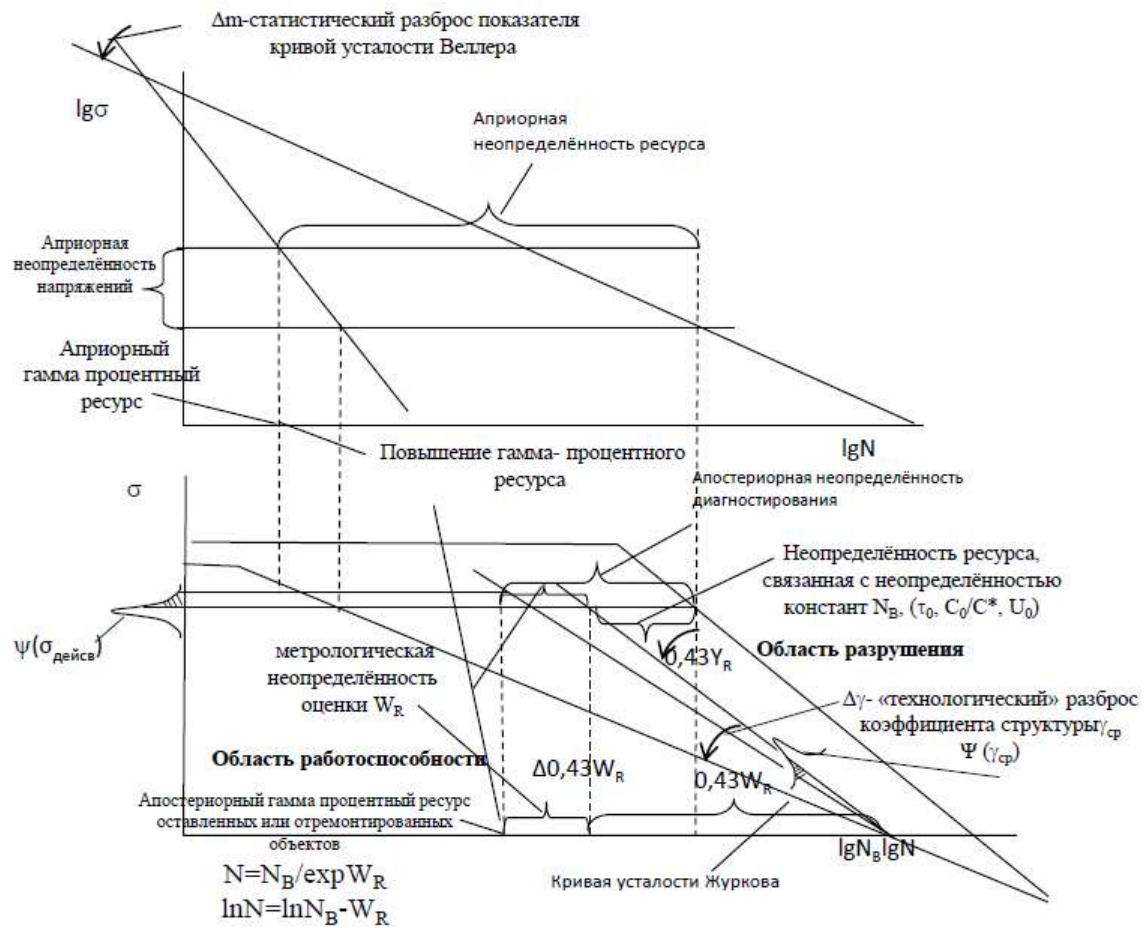


Рисунок 4.15. Кривые усталости материалов и иллюстрация повышения гамма-процентного ресурса на основе повышения точности его прогнозирования за счёт использования диагностического параметра W_{AE}

Выводы по главе 4

В результате исследований:

1. Апробирован метод неразрушающей оценки степени опасности дефектов сжимаемых сварных кольцевых элементов на основе созданной с позиций информационно-кинетического подхода микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии, регистрируемой при корректном диагностическом их нагружении.

2. Дано обоснование приемлемости упрощающего диагностического нагружения сжимаемых элементов во время проведения акустико-эмиссионного контроля.

3. Выявлена возможность определения прогностического участка однородного разрушения сжимаемых кольцевых образцов по кинетическим и статистическим признакам.

Установлена хорошая корреляция значений концентрационно-кинетических акустико-эмиссионных диагностических показателей с величиной расчётных напряжения вблизи дефектов, показала перспективность подхода для оценки ресурса, повышения надёжности и разработки технологии акустико-эмиссионного неразрушающего контроля прочности корпусных сварных элементов глубоководных сооружений.

ГЛАВА 5. МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

5.1. Основные параметры прочностного контроля элементов конструкций глубоководных сооружений.

Изготовленная конструкция отличается от проектной расхождениями как во внешних макрогеометрических параметрах, так и по параметрам внутренней структуры, что при связанной с влиянием на плавучесть невозможности увеличения толщины оболочки предполагает необходимость проведения неразрушающего контроля. В случае изготовления конструкции с небольшими отклонениями, находящимися в пределах допусков, она признаётся годной и не подлежит доработке или контролю. В случае обнаружения дефектов или превышения фактическими отклонениями от проектных размеров допускаемой величины, выявленной на основе результатов контроля геометрических параметров, уточняется необходимость подкрепления конструкции, снижения допускаемой глубины погружения или максимально возможного их количества. Сферические элементы конструкции не подкрепляются, их использование по назначению ограничивается допустимой глубиной или количеством погружений с учётом контролируемых отклонений [102].

Окончательный вывод о возможной эксплуатации глубоководной конструкции ответственного назначения принимают по результатам гидравлических испытаний, поэтому точность контроля прочности при этом должна быть максимальной. Для проведения рекомендуемых Реестром испытаний посредством имитации погружения прочных корпусов подводной техники и заборного оборудования на предельные глубины Мирового океана используется комплекс наземных гидробарических стендов диагностического контроля, описанных в главе 1. Из-за сложности реализации таких

испытаний наружным давлением по специальному согласованию в соответствии с Правилами [102] их заменяют испытаниям внутренним давлением, по результатам которого судят о работоспособности корпусного элемента.

Оба вида гидравлических испытаний имеют метрологические недостатки, понижающие точность контроля показателей работоспособности. В частности, из-за структурной неоднородности сварных конструкций полученные в статических испытаниях и определяемые пластическими свойствами листа стандартные характеристики их кратковременной прочности не всегда согласуются с показателями выносливости разрушающихся в условиях упругого разрушения сварных швов длительно работающей сварной конструкции, что снижает достоверность контроля. На рисунке 5.1 показано пересечение кривых усталости 1 и 2, 3 и 4 материала и сварного шва. Это означает, что результаты кратковременных статических испытаний, контролирующие пластическое разрушение и смятие корпуса, «пропускают» усталостно-опасные дефекты определяющих длительный ресурс хрупко разрушаемых сварных швов. С другой стороны, растягивающее материал при гидравлическом испытании внутренним давлением диагностическое нагружение интенсифицирует разрушение по всей поверхности оболочки, выявляя, в том числе, и не опасные дефекты, находящиеся при эксплуатации конструкции в зоне сжатия, провоцируя «ложное срабатывание» контроля.

По данным рисунка 5.1 диапазон «пропуска усталостно-опасного дефекта» составляет $\Delta Y_R = 0,019 \text{ МПа}^{-1}$. Это означает, что при норме $Y_R \approx 0,011 \text{ МПа}^{-1}$ выявляться будут дефекты сварных швов с параметром Y_R выше $0,03 \text{ МПа}^{-1}$. Такие дефекты более, чем в 2 раза повышают расчётные напряжения и более, чем в 30 раз снижают ресурс. На рисунке графически показана процедура занижения допустимых напряжений $[\sigma] = \sigma_T - \Delta\sigma = \sigma_T / n_1$, обеспечивающая безопасность от усталостного разрушения по сварному шву и определения одного из компенсирующего неточность контроля коэффициента запаса прочности n_1 . При $\sigma_T = 650 \text{ МПа}$, $\Delta\sigma = 65 \text{ МПа}$ $n_1 = 1,1$

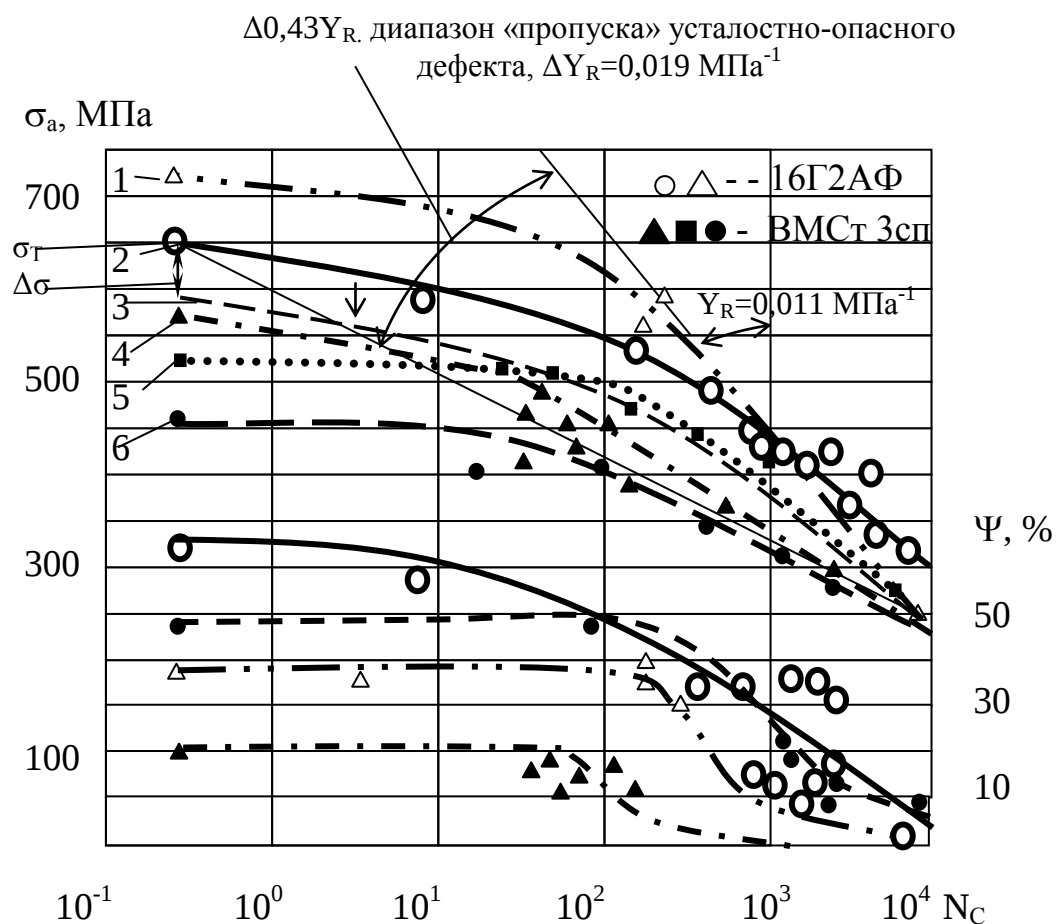


Рисунок 5.1. Кривые малоциклового усталости и изменения пластичности Ψ различных зон сварных соединений сталей 16Г2АФ (1,2) и ВМСт3сп (4,5,6) 1,4-металл углового шва; 2,6- основной металл; 5- металл зоны термического влияния стыкового соединения (по данным [107]), 3-скорректированная на выносливость сварного шва кривая усталости основного металла стали 16Г2АФ.

Данная оценка метрологической погрешности гидравлических испытаний согласуется со значениями коэффициента запаса прочности (см. главу 1), назначаемым по Нормам Морского Регистра с целью обеспечения безопасности эксплуатации прочных корпусов глубоководных аппаратов.

Таким образом, проводимые в настоящий момент проверочные гидравлические прочностные испытания трудоёмки, имеют существенные погрешности в оценке показателей длительной прочности, причиняют существенные повреждения конструкции в ходе их проведения. Для снижения трудоёмкости, повышения оперативности и точности контроля предлагается разработка методики экспресс-контроля состояния сжимаемых корпусных элементов, направленного на определение параметров процесса накопления повреждений в сварных соединениях сжимаемых конструкций посредством определения концентрационно-кинетических АЭ показателей в процессе статического одноосного радиального нагружения в направлении наиболее вероятной потери устойчивости. По предварительной оценке применение этой методики позволит понизить необходимый для обеспечения безопасности коэффициент запаса прочности и повысить допустимую глубину погружения в $1,1 \div 1,2$ раза или при неизменной глубине погружения на порядок увеличить расчётный ресурс конструкции, что чрезвычайно эффективно экономически.

5.2.Способ оценки прочности сварных элементов и допустимой глубины погружения конструкций глубоководных сооружений на основе акустико-эмиссионного контроля

Способ относится к акустическим методам неразрушающего контроля прочности и предназначен для оценки прочности элементов сварного корпуса подводных сооружений сферической и кольцевой формы. Способ может применяться в машиностроении и строительстве. Рассмотрим ближайшие аналоги.

Известен способ неразрушающей оценки прочности композиционных материалов и изделий из них [180]. Способ включает равномерное нагружение диагностируемого изделия, регистрацию при этом числа N_{Σ} импульсов АЭ и прекращение нагружения в момент выхода временной зависимости натурального логарифма $\ln N_{\Sigma}$ числа импульсов АЭ на прямолинейный участок, определение углового коэффициента $d\ln N_{\Sigma}/dt$ этого участка и расчет по его значению разрушающей нагрузки на изделие. Применительно к сжимаемым элементам, недостатком способа является невысокая точность АЭ контроля изделия из-за неопределённости направления нагружения и применения неопределённых параметров контроля.

Известен способ неразрушающей оценки прочности корпусов двигателей, выполненных из композиционных материалов [181], включающий ступенчатое гидронагружение корпуса путем непрерывного подъема давления в корпусе до уровня F_1 , выдержка в течение времени t_1 , подъем давления до второго уровня F_2 , выдержка в течение времени t_2 и так далее до заданного максимального уровня давления. В ходе испытаний проводится регистрация числа N импульсов АЭ. По результатам АЭ испытаний строятся графики временных зависимостей числа импульсов АЭ при различных уровнях давления, в которых выделяли участки, близкие к прямолинейным, определяли угловые коэффициенты N_{Σ_i}' и N_{Σ_j}' этих участков. Определяли параметр состояния материала диагностируемого изделия Y_{AE} и рассчитывали величину разрушающей нагрузки F_p , которую впоследствии сравнивали с рабочей нагрузкой диагностируемого изделия. На основании данного сравнения делался вывод о состоянии диагностируемого изделия.

К недостаткам данного способа можно отнести отсутствие четкой классификации степени опасности, выявленных в ходе контроля источников импульсов АЭ, ограниченные возможности, связанные с необходимостью создания ступенчатой равномерной нагрузки на контролируемое изделие.

Известен способ испытания кольцевых образцов на прочность при повторных нагрузках [182]. Способ включает приложение нагрузки к наружной боковой поверхности образца, регистрацию параметров его деформации, по которым судят о прочности образца. Для имитации реальных условий нагружения кольцевых элементов подводных аппаратов, кольцевые образцы изготавливают из двух частей, соединённых торцами через промежуточный элемент, свободные торцы выполняют в виде конических поверхностей с вершинами на оси колец, герметизируют их крышками с ответными коническими поверхностями, соосно устанавливают и нагружают в осевом направлении, а нагрузку к наружной боковой поверхности образцов прикладывают повторно статически монотонно изменяющимся гидростатическим давлением с различными скоростями, с учетом которых судят о прочности образцов. Недостатком способа является трудоемкость нагружения исследуемых объектов. Для оказания давления на боковые поверхности образца необходимо наличие камеры высокого давления. Для крупногабаритных элементов сварного корпуса установка такой камеры нецелесообразна ввиду трудоемкости ее изготовления и высокой стоимости. Еще одним недостатком является то, что исследуемый элемент нагружают сжимающими напряжениями до его разрушения, а прочность оценивают по величине деформации, являющейся характеристикой другого свойства - жёсткости.

Известен способ неразрушающего контроля прочности металлоконструкций [183], принятый за прототип, включающий нагружение металлоконструкций, регистрацию числа импульсов АЭ и их амплитуды, определение параметра состояния материала контролируемой металлоконструкции Y_{AE} и расчет величины диагностического параметра Y_R . После определения данных параметров величину Y_{AE} сравнивают с величиной Y_R для определения степени опасности источника импульсов АЭ. Далее определяют коэффициенты снижения предела выносливости $K_{пр.в}$ и запаса выносливости S . В завершение определяют исходный ресурс N_c исследуемой

металлоконструкции и находят остаточный ресурс $N_{\text{ост}}$, после чего делают окончательный вывод о дальнейшем использовании металлоконструкции.

Недостатком способа является отсутствие указания направления нагружения исследуемого объекта, что в свою очередь не позволяет реализовать его применительно к корпусам глубоководных аппаратов из-за существенного отклонения от рабочего напряжённого состояния.

Техническим результатом изобретения является снижение трудоемкости нагружения и повышение точности контроля прочности кольцевых и сферических элементов сварного корпуса подводного аппарата, выявление развивающихся и склонных к развитию дефектов, проявляющихся в процессе изменения нагрузки, определение пригодности элементов корпуса к дальнейшему использованию или необходимости проведения ремонта или замены данной металлоконструкции.

Технический результат достигается тем, что нагружение, необходимое для инициирования сигналов АЭ, производят радиально, прикладывая нагрузку по окружностям определенного диаметра или линиям определенной длины в направлении наиболее вероятной потери устойчивости (минимальной оси для кольцевого сечения) с двух взаимно противоположных сторон до напряжений ниже предела текучести материала, а контроль прочности производят посредством определения на основе регистрации числа импульсов АЭ или суммарной амплитуды сигналов АЭ диагностического параметра $W_{\text{АЭ}}$, значение которого связано со степенью опасности дефектов, ресурсом, временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p , где $W_{\text{АЭ}}$ определяется по формуле:

$$W_{\text{АЭ}} = \frac{d \ln(\xi)}{dK_n},$$

где ξ - информационный параметр, в качестве которого используют число N_Σ импульсов АЭ или суммарную амплитуду сигналов АЭ, накопленных на этапе однородного разрушения;

$$K_n = \frac{F}{F_{раб}} - \text{коэффициент нагрузки};$$

$F_{раб}$ - величина осевой нагрузки диагностического нагружения, соответствующая рабочим напряжениям;

σ - напряжение;

После определения W_{AE} решение от работоспособности принимается на основе сравнения его значения с его критической величиной $[W_{AE}]$ (рис. 4.12), или рассчитывается остаточный ресурс по формуле:

$$N_{ост} = \frac{N_B}{\exp(W_{AE})} - N_{np},$$

где $N_B = N_G \sigma_R^m$ - характеристический параметр материала и вида сварного соединения, температуры и частоты его нагружения;

N_G - число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости;

σ_R - предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии цикла рабочих напряжений;

m - показатель степени кривой усталости;

$N_{np} = \omega_N t_{пп}$ - фактическое число циклов нагружения;

ω_N - частота циклов нагружения;

$t_{пп}$ - фактически (предварительно) отработанный ресурс.

В результате всего перечисленного делается вывод о дальнейшем использовании диагностируемого элемента.

Способ осуществляется следующим образом. Для инициирования сигналов АЭ необходимые рабочие напряжения в материале корпуса аппарата имитируют распределённым по окружностям или линиям определенного диаметра или длины приложением нагрузки в направлении минимальной оси кольцевого сечения с двух взаимно противоположных сторон до напряжений ниже предела текучести материала. В процессе нагружения с помощью диагностической акустико-эмиссионной системы

фиксируются число импульсов АЭ, амплитуда сигналов, величина нагрузки, время, длительность импульсов и другие параметры. По полученным данным строятся графики изменения нагрузки и логарифма числа импульсов АЭ или же суммарной амплитуды сигналов АЭ от времени. Для оценки прочности определяем значение диагностического параметра W_{AE} на участке упругого кинетически однородного разрушения.

Зная величину параметра W_{AE} , можно сделать вывод о прочности элемента сварного корпуса, сравнив его с критическим значением $[W_{AE}] = Y_R[\sigma]$, где Y_R – показатель кривой усталости $\ln N_c - \sigma$, N_c – число циклов до разрушения, $[\sigma]$ – допускаемые напряжения (из проектных расчётов). В случае отсутствия данных, значение $[W_{AE}]$ принимается равным единице. Рассмотрим пример определения параметра $[W_{AE}]$.

1. По данным кривой усталости определяем значение характеристического параметра материала, например для стали 09Г2С по рис. 4.13 имеем $N_B = 10^{10}/1,58$, $\ln N_B = 10 \ln 10 - \ln 1,58 = 10 \cdot 2,303 - 0,457 = 23,03 - 0,457 = 22,573$

2. Прогнозируемое число погружений аппарата:

- на рабочую глубину

$$N_{\text{раб}} = 10^4, \ln N_{\text{раб}} = 9,21,$$

- на предельную глубину

$$N_{\text{пред}} = 300, \ln N_{\text{пред}} = 5,704$$

Если при одном погружении корпус испытывает 10^5 циклов изменения напряжений в связи с волновыми циклическими упругими колебаниями ($\ln 10^5 = 11,513$), то допускаемые значения диагностического параметра (рис. 4.12)

$$[W]_{\text{раб}} = 22,573 - 9,21 - 11,513 = 1,845,$$

$$[W]_{\text{пред}} = 22,573 - 5,704 - 11,513 = 5,534$$

Оценка состояния производится на основании классификации по табл. 5.1: если $W_{AE} \leq 0$, то принимается, что состояние конструкции работоспособно, коэффициент запаса статической прочности n более некоторого,

превышающего значения требуемого, повышенного значения $n_{пов} = 1,6 \div 5$. При $0 < W_{AE} \leq [W_{AE}]$ принимается, что значения коэффициента запаса прочности попадают в диапазон $[n] < n < n_{пов}$, где $[n]$ – требуемый коэффициент запаса статической прочности (в связи с повышением оценки точности принимаем обоснованное повышением точности контроля заниженное значение $[n] = 1,2 \div 1,3$), состояние корпуса работоспособно. При $W_{AE} > [W_{AE}]$ работоспособность металлоконструкции принимается ограниченной, величина допускаемой глубины погружения должна быть снижена не менее, чем в $W_{AE}/[W_{AE}]$ раз. При $W_{AE} > [n] \cdot [W_{AE}]$ источник импульсов АЭ классифицируется как катастрофически активный, дефект признаётся опасным и состояние металлоконструкции - неработоспособным.

Таблица 5.1. Оценка состояния изделия и классификация источников АЭ по параметру W_{AE}

Класс опасности источника АЭ	Диагностический признак	Состояние контролируемого объекта и источника АЭ
I	$W_{AE} \leq 0$	Эксплуатация допускается, пассивный
II	$0 < W_{AE} < [W_{AE}]$	Эксплуатация допускается, активный
III	$W_{AE} \geq [W_{AE}]$	Может эксплуатироваться с ограничениями, критически активный источник АЭ, Допускаемая глубина погружения должна быть снижена не менее чем на 25%
IV	$W_{AE} \geq [n][W_{AE}]$	Эксплуатация не допускается, катастрофически активный. Объект подлежит снятию с эксплуатации и списанию.

Здесь $[n]$ – это требуемый коэффициент запаса статической прочности.

Главным преимуществом параметра W_{AE} является то, что он контролепригоден и информативен в условиях неопределённости напряжённого состояния сложного нагруженных статически неопределимых конструкций. Применение данного способа оценки прочности элементов сварного корпуса подводного сооружения позволяет выявлять опасные дефекты, дает возможность определить классы опасностей дефектов, выявленных в ходе контроля, а также оценить прочностное состояние, глубину погружения и остаточный ресурс элементов сварного корпуса. Исходя из нормативного срока эксплуатации корпусных конструкций аппарата (примерно 25 лет) и значений параметра W_{AE} , определяется величина остаточного ресурса и допустимая частота его погружения.

Параметр W_{AE} может быть использован для определения допустимой рабочей глубины погружения по вытекающему из формулы Лапласа выражению

- для корпусов цилиндрической формы

$$h_{\text{раб}} = 200 \sigma_{\text{раб}} S / (D \cdot W_{AE}), \text{ м}$$

- для корпусов сферической формы,

$$h_{\text{раб}} = 400 \sigma_{\text{раб}} S / (D \cdot W_{AE}), \text{ м}$$

где $\sigma_{\text{раб}}$ – допускаемое рабочее напряжение, S -толщина стенки прочного корпуса, мм, D - его диаметр, мм (в знаменателе не указано равное 10000 н/м^3 произведение плотности воды на ускорение свободного падения, в совокупности с размерностью рабочих напряжений ($\text{МПа} = 1000000 \text{ Па}$, $\text{Па} = \text{н/м}^2$) даёт $1000000 \text{ н/м}^2 / 10000 \text{ н/м}^3 = 100 \text{ м}$, что учтено коэффициентом 200)

5.3.Методика неразрушающего контроля прочности элементов основного корпуса глубоководного аппарата

Методика основана на оценке диагностического параметра W_{AE} и применительно к глубоководным аппаратам в условиях неопределённости

напряжённого состояния и высокой вероятности потери устойчивости сжимаемых металлоконструкций реализуется по следующему алгоритму.

1. Объекты контроля подготавливают к механическому нагружению с одновременной регистрацией сигналов АЭ. Для этого должны быть определены все геометрические параметры объекта, места расположения сварных швов, шпангоутов, зоны высоких напряжений, рассчитано наиболее вероятное направление потери устойчивости при всестороннем сжатии в рабочий период эксплуатации. Расчет производится по уточненным зависимостям с учетом местного изгиба обшивки у шпангоутов и разгружающего влияния поперечных переборок на устойчивость шпангоутов.

2. После проведения подготовительных работ осуществляются непосредственные работы по АЭ контролю, которые начинаются с установки преобразователей АЭ (ПАЭ) на объект. Количество и размещение ПАЭ определяется конфигурацией объекта и максимальным разнесением ПАЭ, связанным с затуханием сигнала, точностью определения координат дефектов. Размещение ПАЭ должно обеспечивать контроль всего объёма контролируемого объекта. В ряде случаев допускается размещение ПАЭ только в областях объекта, которые считаются важными. Учитываются критические места (“горячие точки”) объекта - сварные швы, зоны высоких напряжений, зоны, подвергнутые ремонту, и т.д. Координаты источников акустической эмиссии вычисляют по разнице времён прихода (ВРП) сигналов на преобразователи, расположенные на объекте.

3. Нагружение объекта производят статически посредством приложения с постоянной скоростью роста радиальной нагрузки в направлении наиболее вероятной потери устойчивости. Максимальное значение нагрузки должно составлять не менее $1,15 F_{\max}$, где $F_{\max}$ - допускаемая радиальная нагрузка на металлоконструкцию, соответствующая допускаемым рабочим напряжениям в ней. Величина $F_{\max}$ и направление наиболее вероятной потери устойчивости

определяется на основе анализа напряжённого состояния численными методами расчёта с применением программного обеспечения ANSYS (рисунок 5.2).

4. В процессе нагружения металлоконструкции производится регистрация сигналов АЭ, определение значения диагностического параметра W_{AE} , оценка работоспособности и остаточного ресурса.

Диагностический параметр W_{AE} в условиях неопределённости напряжённого состояния элементов металлоконструкций определяют по формуле:

$$W_{AE} = \frac{(\ln \frac{\xi_j}{\xi_i} + \ln \frac{k_{AEi}}{k_{AEj}})}{\Delta K_H} \quad (5.2)$$

где ξ_i , ξ_j – значения информативного АЭ-параметра при нагрузках F_i и F_j соответственно, k_{AEi} , k_{AEj} – акустико-эмиссионные коэффициенты при средних амплитудах A_i и A_j сигналов АЭ соответственно. $\Delta K_H = K_{HJ} - K_{HI}$ – разница коэффициентов нагрузки, K_{HJ} , K_{HI} – коэффициенты нагрузки (доли от допустимой радиальной нагрузки), $0,3 \leq K_{HI} = F_i/F_{max} \leq 1$, $K_{HI} < K_{HJ} = F_j/F_{max} \leq 1,5$.

В качестве информативного параметра ξ_i используют активность АЭ, число импульсов или суммарную амплитуду сигналов АЭ, накопленных на этапе однородного разрушения во время равномерного статического нагружения. Отношение k_{AEi}/k_{AEj} определяется в зависимости от выбранного закона распределения амплитуд импульсов АЭ. При отсутствии мультипликативных помех АЭ-регистрации, и неопределённости номинальных напряжений оценку W_{AE} производят по формуле:

$$W_{AE} = \frac{\ln \frac{\xi_j}{\xi_i}}{\Delta K_H} \quad (5.3)$$

Затем величину W_{AE} сравнивают с величиной $[W_{AE}]$ для диагностики прочностного состояния и относительной оценки работоспособности

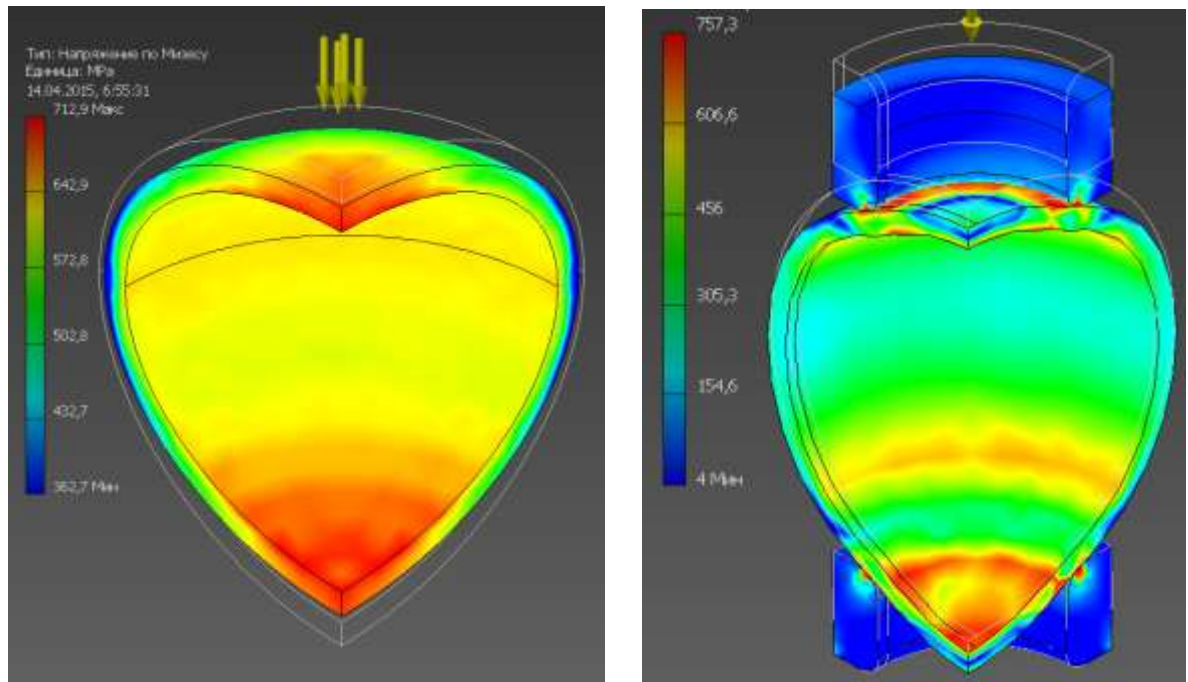


Рисунок 5.2. Анализ напряжений с применением программы Autodesk Inventor Professional со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ ANSYS Design Space в сферическом корпусе для одного из вариантов тестового нагружения.

конструкции, или используют для определения допустимой рабочей $h_{\text{раб}}$ глубины погружения.

Исходный ресурс (число циклов до образования или очередного скачка выявленной трещины) при $W_{\text{AE}} > 0$ определяют по формуле

$$N_C = N_B / \exp W_{\text{AE}},$$

где N_B – характеристический параметр материала и вида сварного соединения, температуры и частоты его нагружения. Величину N_B определяют по кривой усталости, полученной по результатам испытаний стандартных образцов для материала корпуса.

Остаточный ресурс прочного корпуса находят по формуле

$$N_{\text{ОСТ}} = N_B / \exp W_{\text{AE}} - N_{\text{ПР}},$$

где $N_{\text{ПР}}$ – фактическое число циклов нагружения. При допущении того, что из-за волновых колебаний за одно погружение корпус подвергается 100000 циклам изменения напряжений, а нормативный срок эксплуатации корпусных конструкций составляет 25 лет, рассчитывают остаточный ресурс и делают окончательный вывод о целесообразности дальнейшего использования металлоконструкции.

Таким образом, доказано следующее научное положение: неразрушающий контроль прочности глубоководных корпусных сварных конструкций следует производить на основе обработки результатов регистрации параметров акустической эмиссии во время оперативного тестового экспресс-нагружения элемента сварного корпуса в направлении наиболее вероятной потери устойчивости конструкции с двух взаимно противоположных сторон до напряжений ниже предела текучести материала, определения информативного диагностического показателя, связанного с ресурсом и степенью опасности дефектов, и сравнения его значения с его критической величиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Повышение надёжности и безопасности эксплуатации, глубоководных сооружений должно вестись на основе оперативного неразрушающего контроля и оценки их ресурса с позиций микромеханической модели разрушения и совершенствования технологий акустико-эмиссионного контроля.

2. В качестве основы совершенствования АЭ контроля выбраны микромеханическая модель АЭ и дискретизация стадии мелкодисперсного разрушения на различающиеся по прогностическим свойствам этапы неоднородного и однородного разрушения.

3. Оптимизация технологий неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности глубоководных сооружений должно вестись на основе применения обобщённого алгоритма определения представительных АЭ показателей индивидуальных прочностных характеристик объекта контроля и повышения коэффициент корреляции значений этих показателей и стандартных показателей прочностного состояния объекта контроля.

4. Корректный неразрушающий контроль прочности сжимаемых корпусных кольцевых сварных элементов следует производить на основе регистрации сигналов акустической эмиссии во время радиального равномерного тестового экспресс-нагружения элемента в направлении наиболее вероятной потери устойчивости до напряжений ниже предела текучести материала, определения представительного АЭ-показателя, связанного с характеристиками прочности, ресурсом или с степенью опасности дефектов и сравнения его значения с его критической величиной.

5. Разработан способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата (заявка № 2016112868 от 04.04.2016 на «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата», положительное решение о выдаче патента на изобретение от 23.03.2017), который включает в себя нагружение исследуемого объекта, регистрацию числа импульсов акустической

эмиссии и их амплитуды, определение связанного с характеристиками прочности значения акустико-эмиссионного представительного параметра и его сравнение с допускаемой величиной.

6. На основе предложенного способа оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата разработана методика неразрушающего контроля прочности элементов основного корпуса глубоководного аппарата, позволяющая определить классы опасности дефектов, выявленных в ходе контроля, остаточный ресурс и допустимую рабочую глубину погружения глубоководного аппарата. По предварительной оценке применение методики позволит понизить необходимый для обеспечения безопасности коэффициент запаса прочности и повысить допустимую глубину погружения в $1,1 \div 1,2$ раза или, при неизменной глубине погружения, на порядок увеличить расчётный ресурс конструкции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015. С. 182-190.

2. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253

3. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиян 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.

4. Носов В.В., Зеленский Н.А. Контроль и диагностика кольцевых

элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Контроль. Диагностика. 2016. №12. С.30-39.

5. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Оценка прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Дефектоскопия, 2017, № 2, стр.3-9

6. Носов В.В., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.**, Матвиян И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101.

В изданиях, цитируемых в БД Scopus

7. Nosov V. V., N.A. Zelenskii. Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of Temporal Dependences of Acoustic-Emission Parameters// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 89–95.

Публикации в других научных изданиях

8. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Разработка нагружающего устройства для проведения акустико-эмиссионного исследования элементов прочного корпуса подводного аппарата(тезисы)// Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сборник трудов II международной научно-практической конференции. Том II/ Под ред. Е.И.Пряхина. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 205 с. С.135-138.

9. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Определение степени опасности дефектов сварных швов корпуса подводного аппарата с помощью явления акустической эмиссии // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том IV/ Под ред. В.В.Максарова / – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015, 106 с., с. 41-44

10. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Акустико-эмиссионные исследования дефектов прочного корпуса подводного аппарата// Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 2.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.. С.90-94.

11. **Зеленский Н.А.**, Носов В.В., Дефектоскопия корпусных конструкций подводных аппаратов, основанная на явлении акустической эмиссии// Материалы XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее– 2015». СПб– ОАО«ЦКБ МТ«Рубин», 2015. 560 с. С.120-127

12. Носов В.В., **Зеленский Н.А.**, Матвиев И.В., Ямилова А.Р. Влияние неоднородности на информативность диагностических параметров акустической эмиссии// Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016, С. 96-99.

13. Носов В.В., **Зеленский Н.А.**, Матвиев И.В., Ямилова А.Р. Оценка информативности акустико-эмиссионного показателя прочности/ Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» Том IV.СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. С.100-103.

14. Носов В.В, **Зеленский Н.А.** Обеспечение безопасности глубоководных аппаратов посредством контроля состояния прочного корпуса// III Международная научно-практическая конференция “Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Тезисы докладов. / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с., С. 119, 143

15. Носов В.В., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.**, Матвиян И.В. Диагностирование прочностного состояния сварных соединений// III Международная научно-практическая конференция “Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Тезисы докладов. / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с., С. 142.

16. Носов В.В., Матвиян И.В., **Зеленский Н.А.**, Ямилова А.Р. Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал, № 3(14) 2016. Полный текст статьи https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/NosovSoavtors_3_16_1.pdf

Подана заявка на патент рег.№ 2016112868 от 04.04.2016 на изобретение Способа оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата, получено положительное решение о выдаче патента на изобретение от 23.03.2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. / Под ред. Л.Н. Степановой. — М.: Радио и связь, 2000.— 280 с.
2. Акустико-эмиссионный метод контроля процессов пластической деформации и разрушения металлических материалов
http://www.sds.ru/articles/ae_review/index.html
3. Акустическая эмиссия при деформации отождённого сплава АМг6. / Тихонов Л.В., Тихий В.Г., Прокопенко Г.И. и др. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — № 7, 1988.
4. Акустическая эмиссия при малоцикловых испытаниях сварных тавровых элементов натурных конструкций. / А.С.Трипалин, В.М.Шихман, В.И.Коваленко и др. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — вып. 1, 1985, с. 89–93.
5. Алёшин Н.П., Бигус Г.А. Применение акустических методов контроля при оценке остаточного ресурса резервуаров и трубопроводов. // Безопасность труда в промышленности. — № 11, 2001, с. 18–23.
6. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Использование акустической эмиссии для оценки трещиностойкости материалов при монотонном нагружении. // Физико–химическая механика материалов. — № 4, 1983, с. 110–114.
7. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. — Киев: Наук. думка, 1989, 176 с.
8. Апасов А.М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали.- Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 2.
9. Архангельский А. Я. Разработка прикладных программ для Windows в Delphi5. — М.: Бином, 1999.
10. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990, 320 с.

11. Баранов В.М. О выборе диагностических параметров и признаков в АЭ–исследованиях и контроле. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – № 1, 1993, с. 6–9.
12. Баранов В.М., Грязев А.П. Звуковое излучение при расширении сферической полости в изотропной упругой среде. // Дефектоскопия. – № 11, 1979, с. 28–34.
13. Баранов В.М., Губина Т.В. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов/ Учебн. Пособие. М.:МИФИ, 1990.-72 с.
14. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М. Использование кинетической теории разрушения для определения параметров акустико–эмиссионных сигналов при докритическом росте трещин в твёрдых телах. // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов: Тематический сборник. / АН СССР ФТИ им. А.Ф.Иоффе. – Л.,1986. с. 22–27.
15. Баранов В.М., Молодцов К.И. Акустико–эмиссионные приборы ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1980, 144 с.
16. Беженов С.А., Буйло С.И. Некоторые аспекты диагностики долговечности и предразрушающего состояния конструкционных материалов методом акустической эмиссии. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – № 4, 2001, с. 24–27.
17. Бетехтин В. И., Глезер А. М., Викарчук А. А. Физика прочности и пластичности твердых тел: проблемы и перспективы // Изв. РАН. Сер. физ. – 2004. – 68; № 10. – с. 1382 – 1383.
18. Бигус Г. А., Дорохова Е. Г. Идентификация источника АЭ на основе параметров распределения вероятности амплитуды сигнала АЭ // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - № 3, 1998, с. 25 – 31.
19. Биргер И.А. Техническая диагностика – М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
20. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984, 312 с.

- 21.Буйло С.И., Трипалин А.С. О связи амплитудного распределения импульсов акустической эмиссии с особенностями повреждения в структуре материала. // Автоматическая сварка. – №5, 1984, 16–21.
- 22.Буйло С.И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твёрдых тел. // Дефектоскопия. – № 2, 2002, с. 48–53.
- 23.Буйло С. И. Физико-механические и статистические аспекты акустико-эмиссионного исследования дефектов в твердых телах // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы, 2009.03.03, http://ptosnm.ru/_files/Moduls/catalog/items/T_catalog_items_F_download_I_398_v1.pdf
- 24.Бураков И.Н. Методика прогнозирования работоспособности сварных соединений металлоконструкций методом акустической эмиссии: Дис. ... к-та техн. наук.- Санкт-Петербург, 2004 г. - 189 с.
- 25.Вайнберг В.Е., Кантор А.Ш., Лупашку Р.Г. Применение кинетической концепции разрушения для расчёта интенсивности акустической эмиссии. // Дефектоскопия. – № 3, 1976, с.89–96.
- 26.Вакар К.Б., Красильников Д.П., Овчинников Н.И. Некоторые результаты промышленного применения АЭ–метода контроля. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – Вып. 7, 1988, с. 72–79.
- 27.Галкин Д. И. Разработка методики безобразцовой экспресс диагностики поврежденности металла эксплуатируемых магистральных нефтепроводов на основе метода акустической эмиссии, спец. 05.02.11, автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. т. н., Москва 2011, 16 с.
- 28.Гецов Л.Б. Многомодельный метод выбора критериев термоусталостного разрушения деталей при эксплуатации. // Научно–технические ведомости СПбГТУ. – № 3, 2003, с.168–176.
- 29.Гомера В.А., Потапов А.И. Акустико–эмиссионная диагностика коррозионного растрескивания в аминных абсорберах высокого давления. // Неразру-

- шающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: Межвуз. сборник. – вып.3 – СПб.: СЗТУ, 2001, 192 с.
30. Горяинов, Юрий Афанасьевич. Несущая способность глубоководных трубопроводов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.15.13.- Москва, 2000.- 135 с.: ил. РГБ ОД, 61 00-5/2059-X
<http://dslib.net/api/download/?id=1271383702&key=D6ozbVtapb7ONMBE>
31. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Издательство стандартов. – 1976, 272 с.
32. Гулевский И.В. Акустико–эмиссионный контроль целостности оболочки сосуда давления во время гидроопрессовки. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – вып. 5, 1987, с. 59–62.
33. Гулевский А.В. Обнаружение устойчивого роста трещин методом акустической эмиссии. // Автоматическая сварка. – №5, 1984, с. 16–21.
34. Детали машин: Учеб. для вузов / Л.А. Анбрейченко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; Под ред. О.А. Ряховского. – М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2002, 544 с.
35. Детков А.Ю., Потапов А.И. Опыт применения метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле композиционных материалов. ЛДНТП, 1975.-40 с.
36. Диагностика технических устройств / Г.А.Бигус, Ю.Ф.Даниел, Н.А. Быстрова, Д.И.Галкин.– М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014 -615 с, ил.
37. Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов – Л. Изд-во Судостроение, 1978, 235 с.
38. Жуков В.А. Конструктивная прочность. Жаропрочные и радиационно-стойкие сплавы : Учеб. пособие / В.А. Жуков. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2016. 120 с.

39. Ельчанинов Г.С. Методика прогнозирования работоспособности сложно нагруженных машиностроительных конструкций. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2011, 174 с
40. Ёкобори Т. Комбинированный подход к хрупкому и усталостному разрушению материалов. Пер. с яп. – Сб. переводов иностр. статей. Механика. – №5 (147), 1974, с. 95–107.
41. Иванов В.И. Особенности непрерывного мониторинга оборудования опасных производственных объектов// В мире неразрушающего контроля, 2008, № 3, С.4-6.
42. Иванов В.И., Белов В.М.. Акустико–эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981, 184 с.
43. Иванов В.И., Бигус Г.А., Власов И.Э. Акустическая эмиссия. Учебное пособие. – М: Спектр, 2011. -192 с.
44. Иванов В.И., Быков С.П. Классификация источников акустической эмиссии. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – Вып. 1. Теория, методы и средства акустико–эмиссионной диагностики, 1985, с. 67–74.
45. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12Х18Н10Т / Башков О. В., Панин С. В., Семашко Н. А., Петров В. В., Шпак Д. А. // Завод. лаб.: Диагност. матер. – 2009. – 75; № 10. с. 51 – 57.
46. Иноземцев Ю.П. О микротрещинообразовании цементного камня // Акустическая эмиссия и разрушение композитных материалов/ Тематический сборник. Душанбе. 1987. - 150 с.
47. Интенсивность акустической эмиссии при трещинообразовании. / Вайнберг В.Е., Лупашку Р.Т., Кантор А.М. и др. // Проблемы прочности. – №9, 1975, с. 92–94.
48. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных спец. вузов. -М.: Машиностроение, 1988.-368 с.: ил.

49. Итоги II Международной Научно-Технической Конференции «Инновационные технологии в методе акустической эмиссии», КОСЦ «Липки», Москва, 2-12 ноября 2010 г.
50. Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления. – Л.: Машиностроение, 1982, 287 с.
51. Карзов Г.П., Никонов Ю.А., Несмашный Е.В. Схема эксплуатационного контроля конструкций методом акустической эмиссии. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – Вып. 1. Теория, методы и средства акустико-эмиссионной диагностики, 1985, с. 97–101.
52. Козинкина А. И. Моделирование и оценка накопления повреждений в конструкционных материалах на базе данных акустической эмиссии, автореф. дис. на соиск. уч. степ. док. техн. наук, спец. 01.02.04, Москва, 2008, 34 с.
53. Козинкина А. И., Рыбакова Л. М., Березин А. В. Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – Т. 72, № 4, 2006, с. 39 – 42.
54. Козинкина А.И., Козинкина У.А. Определение концентрации деформационных дефектов//Прикладная механика и техническая физика. 2010, т.51, № 6, с. 164-170.
55. Крылов В.А. Практический подход к решению задачи акустико-эмиссионной диагностики оборудования АЭС. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – №1, 1990, с. 77–85.
56. Крылов В. А. Определение вероятности саморазрушения металла по спектру акустической эмиссии на стадии предразрушения // Атом. энергия. — Т. 102, № 6, 2007, с. 351-358.
57. Куксенко В. С., Махмудов Х. В., Мансуров В. А., Султанов У., Рустамова М. З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. — 2009. — № 4.

58. Куксенко В.С., Петров В.А. Статистическая кинетика микроразрушения гетерогенных материалов// Механика композитных материалов. - 1988, N 1, с. 31-35.
59. Кутц К.Х. Акустико-эмиссионный контроль стойкости сварных соединений против образования холодных трещин// Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1985, вып. 5, с. 43-46
60. Лахова Е.Н., Носов В.В. Оценка степени неоднородности структурно-напряжённого состояния материала нахлесточных сварных соединений методом акустической эмиссии // Научно-технические ведомости СПбГПУ 2-2' 2010 С.124-130
61. Лахова Е.Н. Разработка методики прогнозирования работоспособности критически нагруженных конструкций на основе использования явления акустической эмиссии. Дисс. на соиск. ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2012, 153 с.
62. Лексовский А.М., Баскин Б.Л., Якушев П.Н. Коррелированное нелинейное взаимодействие микро / мезо дефектов – новый системно образующий механизм разрушения гетерогенной системы при её деформировании в условиях стесненной деформации/ Четвёртая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием. 3-8- октября 2016 г. – в 2- томах, Т.1. М.: ИФЗ. с.282-289. http://www.ifz.ru/lab_204/konferencii/chetvertaja-tk-2016/materialy-konf/razdel-4/
63. Лысак Н.В. Об акустико–эмиссионной оценке прочности материалов при малоцикловом нагружении. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – № 3, 1992, с. 18–25.
64. Макаров Р.А. Средства технического диагностирования машин. – М.: Машиностроение, 1981, 223 с.
65. Манжула К.П., Петин С.В. Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, 76 с.

66. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Основные закономерности нелинейного деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – №3, 2003, с.48–58.
67. Методика акустико-эмиссионного контроля металлических опор контактной сети. / Бырин В.Н., Макшанов А.В., Пыжов А.А. и др. // Безопасность труда в промышленности, – №4, 2003 г, с.41– 45.
68. Методические аспекты оценки остаточного ресурса оборудования потенциально опасных объектов. / Н.А. Махутов, А.А.Шаталов, А.М. Лепихин и др. // Безопасность труда в промышленности. – №11, 2002, с.19–23.
69. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии при определении статистической трещиностойкости материалов. / А.Е.Андрейкив, Н.В.Лысак, В.Р.Скальский, О.Н. Сергиенко.– Львов / ФМИ им. Г.В.Карпенко АН УССР, 1990, 34 с.
70. Методологические аспекты оценки прочности и остаточного ресурса сосудов давления на основе акустико-эмиссионной диагностики / Волковас В., Дорошевич В., Эльманович В. И., Багмутов Д. В. // Дефектоскопия. – 2004. - № 11, с. 50 – 61.
71. Механика малоциклового разрушения. / Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. и др. – М.: Наука, 1986, 264 с.
72. Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Труды международной научной конференции 26-29 октября 2004, Изд. политехн. Ун-та, 2004, 77 с.
73. Недзведская О.В., Буденков Г.А., Котоломов А.Ю. Количественные оценки возможностей неразрушающего контроля на базе явления акустической эмиссии. // Дефектоскопия. – № 6, 2001, с.50–67.
74. Недосека А.Я. Основы расчёта сварных конструкций. – Киев. Выща шк. – 1988, 263 с.

75. Недосека С.А., Недосека А.Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 1. – С. 9-16.
76. Недосека С.А. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. -Киев. 2010 г -34 с.
77. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагност. и неразруш. контроль. - № 2, 2008, с. 5 – 14.
78. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалёв и др.: Под общей ред. Клюева В.В. –М.: Машиностроение, 2003 г, 656 с.
79. Новиков С.С. Конструкция корпуса подводных лодок и глубоководных аппаратов: Учеб. пособие/СПбГМТУ; СПб, 2005, 95 с.
80. Новинки программного обеспечения АЭ-системы семейства А-Line/ С.В. Елизаров, А.В.Букатин, Н.Ю.Ростовцев, Д.А. Терентьев //В мире неразрушающего контроля, 2008, № 3, С.18-21
81. Нормы для расчёта и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). ГосНИИВ – ВНИИЖТ, М., 1996, 319 с.
82. Носиков А.И., Семёнов А.С., Мельников Б.Е. Идентификация функции эволюции повреждений для материала со степенным упрочнением. // «Научно–технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения»: Труды V Международной конференции. СПб.:Изд–во СПбГПУ, 2003, 623 с., с.358–370.
83. Носов В.В. Методология оценки прочности конструкционных материалов, работоспособности и механического состояния технических объектов на основе использования явления акустической эмиссии: Дис.... Д-ра техн. наук - Санкт–Петербург, 1997. - 330с.
84. Носов В.В. Методика определения информативных параметров акустической эмиссии. // Дефектоскопия. – №5, 1998, с. 91–98.

85. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пособие/ Изд-во «Лань», 2016. – 376 с.
86. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия: Учебное пособие//Изд-во «Лань», СПб, 2013, 2-е изд. перераб. и доп., 240 с.: ил.
87. Носов В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций с помощью метода акустической эмиссии// Дефектоскопия, 2009 - N 2 с. 58-66.
88. Носов В.В., Бураков И.Н. Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов. // Дефектоскопия. – №2, 2004, с. 53–61.
89. Носов В.В., Ельчанинов Г.С. Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов. – Дефектоскопия, 2011, N 12, с. 55 – 66.
90. Носов В.В., Лаврин В.Г. Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатанной полосы методом акустической эмиссии// Дефектоскопия , 2012 — № 3 . С. 18-26
91. Носов В.В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии //Дефектоскопия, № 12, 2014, с. 24-35.
92. Носов В.В., Потапов А.И., Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций // Дефектоскопия, № 1, 2015, с. 61-72
93. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)' 2015. С. 182-190
94. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов// Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

95. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А. Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело, 2016, т.14, № 1, С. 244-253
96. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиян 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.
97. Носов В.В., Зеленский Н.А. Контроль и диагностика кольцевых элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Контроль. Диагностика. 2016. №12. С.30-39.
98. Носов В.В., Потапов А.И., Бураков И.Н. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии// Дефектоскопия - 2009, №2, с.58-66
99. Оценка работоспособности и остаточного ресурса тонкостенных сварных сосудов химически опасных промышленных объектов. / А.А.Шаталов, М.П.Закревский, А.М.Лепихин и др. // Безопасность труда в промышленности. – № 7, 2003, с. 34–36.
100. ПБ 03-593-03/ Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. Основной документ, регламентирующий общие положения проведения АЭ контроля в промышленности. Распространяется практически на все виды оборудования. Утвержден Ростехнадзором и является основой всех отраслевых методических документов по АЭ-контролю. СПб.: Издательство ДЕАН, 2004. 64с.
101. Петров, В. А. Сравнительный анализ методик определения ресурса / В. А. Петров, Г. В. Петров, О. Ю. Рыжов // Труды СПбГПУ / Министерство образования Российской Федерации .— СПб., 2005 .— №494: Техноло-

- гические и транспортные системы. Логистика .— С. 8-14 .— (Технологические системы) .— Библиогр.: с. 14.
102. Правила классификации и постройки обитаемых глубоководных аппаратов, судовых водолазных комплексов и пассажирских подводных аппаратов НД №2-020201-005. Морской Регистр Судоходства, 2003. http://snipov.net/database/c_4294955503_doc_4293825791.html
 103. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. НД №2-020301-003. Морской Регистр Судоходства, Санкт-Петербург, 2012. http://snipov.net/database/c_3542965895_doc_4293825872.html
 104. Проектирование основного корпуса подводных аппаратов: Учебник / В.Л. Александров, М.К. Глозман, Д.М.Ростовцева, Н.М. Сиверс. СПб.: Судостроение, 1995.
 105. Пронин В.П., Иванов В.И. Акустическая эмиссия при задержанном разрушении в сварных соединениях. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – №1, 1989, с. 48–52.
 106. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. / Стрижало В.А., Добровольский Ю.В., Стрельченко В.А. и др.; Отв. ред. Писаренко Г.С.; АН УССР. Институт проблем прочности. – Киев: Наук. думка, 1990, 232 с.
 107. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. / Махутов Н.А., и др.– М.: Наука, 1983, 272 с.
 108. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. - М.: Транспорт, 1992.-256 с.
 109. Развитие методической базы и практика проведения экспертизы промышленной безопасности резервуаров и газгольдеров. / Шаталов А.А., Ханухов Х.М., Воронецкий А.Е. и др. // Безопасность труда в промышленности. – №12, 2001, с. 19–23.

110. Расчёт остаточного ресурса образцов из авиаматериалов при их акустико–эмиссионном контроле / Серьёзов А.Н., Степанова Л.Н., Караев А.Е. и др. // Контроль. Диагностика. – №9, 2002, с.13–18.
111. Регель В.Р., Слуцкер А.К., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974, 560 с.
112. Результаты тензометрических испытаний мостовых кранов/ А.А. Сумцов, В.Э. Станиславская, К.М.Манилов, А.Н. Малеванный// Исследование крановых металлоконструкций и механизмов :Сб. науч.тр. М.: ВНИИПТмаш, 1982. С. 109-119.
113. Ринкевич А. Б., Корх Ю. В., Смородинский Я. Г. Перспективы применения неразрушающего контроля для диагностики нано- и микроструктурных материалов, Дефектоскопия, 2010, № 1, с. 14 – 20.
114. РД 50694–90. Методические указания. Надёжность в технике. Вероятностный метод расчёта на усталость сварных конструкций.
115. РД 09–102–95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России.
116. РД 26.260.004-91 Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. Дата введения 01.01.92
117. РД 22-322-02 Краны грузоподъемные. Технические условия на капитальный, полнокомплектный и капитально-восстановительный ремонты
118. РД 10-112-2-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъёмных машин. Часть 2. Краны стреловые общего назначения и краны – манипуляторы грузоподъёмные, 01.05.2009 г.
119. Ромалис Н.Б., Тамуж В.П. Разрушение структурно-неоднородных тел. - Рига: Зинатне, 1989. - 224 с.
120. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов / Фролов Д.И.,

- Килькеев Р.Ш., Куксенко В.С., Новиков С.В. // Механика композитных материалов. – №5, 1980, с. 907–911.
121. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали. / Е.Ю.Нефедьев, В.А. Волков, С.В. Кудряшов и др. // Дефектоскопия.– №3, 1986, с. 41– 44.
 122. Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения: Перевод с японского. – М: Мир, 1986, 334 с.
 123. Смирнов Е.Г. Акустическая эмиссия – М.: ВИНТИ, 1982, с. 111–158.
 124. Соколов, С. А. Коэффициенты интенсивности напряжений для трещин в статически неопределимых конструкциях / С. А. Соколов, С. А. Знатнов // Труды СПбГПУ / Министерство образования Российской Федерации .— СПб., 2005 .— №494: Технологические и транспортные системы. Логистика .— С. 26-32 .— (Технологические системы) .— Библиогр.: с. 32.
 125. Соколов, С. А. Исследование концентрации напряжений в угловых сопряжениях балок / С. А. Соколов, А. А. Грачев // Труды СПбГПУ / Министерство образования Российской Федерации .— СПб., 2005 .— №494: Технологические и транспортные системы. Логистика .— С. 14-20 .— (Технологические системы) .— Библиогр.: с. 20.
 126. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / Павлов П.А., Паршин Л.К., Мельников Б.Е., Шерстнёв В.А.; Под ред. Б.Е. Мельникова – СПб.: Изд-во «Лань», 2003, 528 с.
 127. Способ неразрушающего контроля прочности изделий. Патент № 2270444 Заявка 2004118473/28 от 18.06.2004. Авторы Носов В.В., Михайлов Ю.К., Базаров Д.А., Бураков И.Н.Опубликовано 20.02.2006 бюл. №5.
 128. Справочник по кранам: В 2 т.Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчёта кранов, их приводов и металлических конструкций/ Под общ. Ред. М.М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1988.536 с.
 129. Статистические закономерности малоциклового разрушения. / Н.А. Махутов, В.В.Зацаринный, Ж.Л. Базарас и др. – М.: Наука, 1989, 252 с.

130. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М: Машиностроение, 1985, 231 с.
131. Сухонос С.И. Масштабный эффект — неразгаданная угроза. М.: Новый Центр, 2001. — 68 с
132. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1978, 294 с.
133. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико–механические аспекты. – Издательство Ростовского университета, 1986, 160 с.
134. Трипалин А.С., Шихман В.М. Ряд пьезоэлектрических преобразователей для приёма сигналов акустической эмиссии. // Автоматическая сварка. – №5, 1985, с. 33–37.
135. Фурсов В. А. Теория информации: учеб. / В.А. Фурсов. - Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2011. - 128 с.: ил.
http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Теория%20информации-Фурсов%20ВА.pdf
136. Файвисович А.В. Методика расчёта начальной стадии накопления усталостных поверхностных повреждений. // Заводская лаборатория (диагностика материалов). – №10, 1996, с. 29–32.
137. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. / В.А.Петров, А.Я.Башкарёв, В.И.Веттегрень.–СПб.: Политехника, 1993, 475 с.
138. Характер акустической эмиссии при разрушении сварных соединений с технологическими дефектами. / Переверзев Е.С., Тихий В.Г., Борщевская Д.Г. и др. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных соединений. –Вып. 1. Теория, методы и средства акустико–эмиссионной диагностики. 1985, с. 83–86.
139. Харебов А.Г., Попков. Автоматизированная система комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе // В мире неразрушающего контроля, 2008, № 3, С.14-17.

140. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002, 352 с.
141. Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с непроваром// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2010, № 4 (110). С.137-146.
142. Чернов Д.В. Алгоритм определения начала пластической деформации на основе микромеханической модели акустической эмиссии//Вестник МЭИ. №3, 2016, с.97-103.
143. Чернова В.В. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов. Диссерт... кандидата техн. наук. Томск, 2017, 144 с, <http://portal.tru.ru/council/916/worklist>
144. 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю // Контроль. Диагностика, № 8, 2010, с. 31.
145. Advanced acoustic emission for on-stream inspection of petrochemical vessels / S/ O. Vahaviolos, D. Wang, M. F. Carlos // 9th European conference of NDT September 2006 – Berlin (Germany), <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.6.5.pdf>
146. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory / R. Pullin, K. M. Holford, R. J. Lark, M. J. Eaton // Journal of Acoustic Emission, v. 26, 2008, p. 172 – 181.
147. Anastasopoulos A. A., Kourousis D. A., Cole P. T. Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels // 2nd International Conference On Technical Inspection And NDT – October 2008 – Tehran, Iran, <http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf>
148. Budano S., Giunta G., Lucci A. Acoustic emission data analysis to evaluate damage mechanisms in pipeline carbon steels // http://www.ndt.net/article/ndtnet/2011/24_Budano

149. Catty J. Acoustic emission testing of buried pressure vessels // 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7 – 11, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_04.pdf
150. Chelladurai T., Sankaranarayanan A. S., Purushothaman K. K. Advances in structural integrity evaluation and residual strength prediction of pressure vessels using acoustic emission technique // 15th World Conference on NDT – 2000 – Rome (Italy), <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn188/idn188.htm>
151. Cole P., Gautrey S. Acoustic emission experience with AE monitoring of new vessels during initial proof test // 26th European Conference of Acoustic Emission Testing – 2004 – Berlin (Germany), <http://www.ndt.net/article/ewgae2004/pdf/104cole.pdf>
152. Diagnostics of deformation and fracture stages on the basis of acoustic emission, optical microscopy and strain gauging / S. Panin, S Khizhnyak, O. Bashkov, A. Byakov, I. Shakirov, V. Grenke, M. Poltaranin, P. Lyubutin, D. Shpak, M. Kuzovlev, M. Kirichenko // 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7 – 11, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_15.pdf
153. Gorkunov E. S., Smirnov S. V., Rodionova S. S. Damage and magnetic parameters of steel after plastic deformation under hydrostatic pressure // 16th World Conference on NDT – 2004 – Monreal (Canada), http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/materials_characterization/9_gorkunov.pdf
154. Hay D. R., Cavaco J. A., Mustafa V. Monitoring the civil infrastructure with acoustic emission: bridge case studies // Journal of Acoustic Emission, v. 27, 2009, p. 1 – 10.
155. Introduction to Acoustic Emission Testing // NDT Education Resource Center: site. 2001 – 2010. URL: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm (дата обращения: 08.04.2010).
156. Ivanov V. I. The prime problems of acoustic emission diagnostics of technical devices and constructions // 10th European Conference of Non-Destructive

- Testing, Moscow 2010, June 7 – 11, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_03.pdf
157. Lackner G., Schauritsch G., Tscheliesnig P. Acoustic emission: a modern and common NDT method to estimate industrial facilities // 9th European Conference on NDT, September 2006 – Berlin (Germany), <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.6.4.pdf>
 158. Lazarev A., Vinogradov A. About plastic instabilities in iron and power spectrum of acoustic emission, Journal of Acoustic Emission, v. 27, 2009, p. 144 – 156.
 159. Mazal P. Current possibilities of AE method application in selected areas of industrial practice // 10th International Conference of the Slovenian Society for NDT, September 1 – 3, 2009, Ljubljana, Slovenia, <http://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2009/PDF/P30.pdf>
 160. Moura A., Yukalov V. I. Self-similar extrapolation for the law of acoustic emission before failure of heterogeneous materials, http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0302/0302258v1.pdf
 161. Muravin B. Acoustic Emission Method. History. Fundamentals. Applications, 2009. URL: <http://www.muravin.com/ae/Muravin%20-%20Acoustic%20Emission%20Method%20-%20short%20presentation%20for%20students.ppt> (дата обращения: 08.04.2010)
 162. Nefedyev E. Experience of implementing the method of acoustic emission test operation of equipment at the static fracture, cyclic fracture and stress- corrosion cracking // 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7 – 11, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_20.pdf
 163. Paiziev A., Knyazev E. The defective structure of plastically deformed constructional steel 12X18H10T, <http://www.ndt.net/article/v09n07/paiziev/paiziev.htm>
 164. Quantitative acoustic emission NDT for analyzing dynamic fracture / G. Muravin, C. W. Adams, B. Muravin, E. Turkel, L. Lezvinsky // 16th World

- Conference on NDT – 2004 – Monreal (Canada),
http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/reliability/513_muravin.pdf
165. Rauscher F. Defect detection by acoustic emission of metallic pressure vessels
 // 26th European Conference of Acoustic Emission Testing – 2004 – Berlin
 (Germany), <http://www.ndt.net/article/ewgae2004/pdf/105rauscher.pdf>
 166. The investigation of artificial neural network pattern recognition of acoustic
 emission signals for pressure vessels / G. Shen, Q. Duan, B. Li, Q. Liu // 15th
 World Conference on NDT – 2000 – Rome (Italy),
<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn438/idn438.htm>
 167. Defect Detection in Stainless Steel Uranus 45 TiG–Welded Joints by Acoustic
 Emission // Materials Evaluation. – №3, 1987, p. 348–352.
 168. Dunegan H.L., Harris D. Acoustic emission – a new nondestructive testing
 tool. // Ultrasonic. – №3, 1969, p.160–166.
 169. Dunegan H.L., Harris D., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic
 emission // Engineer Fracture Mech. №1, 1968, p.105–122.
 170. Green A.T., Lockman C.S., Steele R.K. Acoustic verification of structural
 integrity of Polaris Chambers Society of Plastic Engineers. // Atlantic City, N.J.,
 1964.
 171. Hutton P.H. Acoustic emission in metals and NDT tools. // Materials
 Evaluation. – v. 26, 1968, p.125–129.
 172. Keiser I. Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von geräuschen bei
 zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen // Arch Eisenhüttenwesen,
 1953, Bd. 24, H 11/2, s. 43 – 45.
 173. McNally D.J. Inspection of Composite Rocket Motor Gases using Acoustic
 Emission. // Materials Evaluation. – №6, 1985, p. 728–732.
 174. Mogul M.G. Reduce corrosion in amine gas absorption columns. Hydrocarbon
 Processing, Belsona Inc., Miami, Florida. – vol. 78, № 10, October, 1999.
 175. Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission. // Ed. J.C. Spanner, J.W.
 McElroy. ACTMSTP. 571, Philadelphia, 1975, 289 p.

176. Shen Gongtian, Wu Zhanwen. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane // Insight: Non-Destruct. Test. and Cond. Monit. — 2010 .— 52; № 3 .— с. 144-147 .— ISSN 1354-2575. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf
177. Не надо больше гадать. Мечта становится явью: анализ методом конечных элементов теперь интегрирован в САПР! // САПР и графика 2005, № 10 <http://sapr.ru/article/14586>.
178. Глубоководные сооружения и их система энергообеспечения // Электронная газета ZIV. <http://ziv.ru/tehnologii/6673-glubokovodnyie-sooruzheniya-i-ih-sistema-energoobespecheniya.html>
179. Чайников К.Н. Общее устройство судов. Конструкция корпуса подводных лодок. <http://flot.com/publications/books/shelf/chainikov/32.htm>
180. Носов В.В., Носов С.В. Акустико-эмиссионный критерий прочности композитных материалов //Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1989. - № 9, с.25-29.
181. Носов В.В., Потапов А.И. Оценка прочности корпусных изделий при их гидроиспытаниях по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии// Дефектоскопия - 1998, №5, с.99-107.
182. Авторское свидетельство SU № 1739259, опубл. 07.06.1992 г.
183. Патент на изобретение № 2445616 (21) (22). Способ неразрушающего контроля прочности металлоконструкций. Авторы носов В.В., Ельчанинов Г.С., Тевосянц Д.С. Заявка 2010150121/28, 06.12.2010, опубл. 20.03.2012 Бюл.№8
184. Носов В.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Дефектоскопия, 2017, № 2, стр.3-9

185. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ, 2017, № 2. С. 96-101.
186. Nosov V. V., N.A. Zelenskii. Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of Temporal Dependences of Acoustic-Emission Parameters// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 89–95.
187. Носов В.В., Зеленский Н.А. Разработка нагружающего устройства для проведения акустико-эмиссионного исследования элементов прочного корпуса подводного аппарата(тезисы)// Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сборник трудов II международной научно-практической конференции. Том II/ Под ред. Е.И.Пряхина. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 205 с. С.135-138.
188. Носов В.В., Зеленский Н.А. Определение степени опасности дефектов сварных швов корпуса подводного аппарата с помощью явления акустической эмиссии // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том IV/ Под ред. В.В.Максарова / – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015, 106 с., с. 41-44
189. Носов В.В., Зеленский Н.А. Акустико-эмиссионные исследования дефектов прочного корпуса подводного аппарата// Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 2.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.. С.90-94.
190. Зеленский Н.А., Носов В.В., Дефектоскопия корпусных конструкций подводных аппаратов, основанная на явлении акустической эмиссии// Материалы XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее– 2015». СПб– ОАО«ЦКБ МТ«Рубин», 2015. 560 с. С.120-127

191. Носов В.В., Зеленский Н.А., Матвиян И.В., Ямилова А.Р. Влияние неоднородности на информативность диагностических параметров акустической эмиссии// Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016, С. 96-99.
192. Носов В.В., Зеленский Н.А., Матвиян И.В., Ямилова А.Р. Оценка информативности акустико-эмиссионного показателя прочности/ Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» Том IV.СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. С.100-103.
193. Носов В.В, Зеленский Н.А. Обеспечение безопасности глубоководных аппаратов посредством контроля состояния прочного корпуса// III Международная научно-практическая конференция “Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Тезисы докладов. / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с., С. 119, 143
194. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиян И.В. Диагностирование прочностного состояния сварных соединений// III Международная научно-практическая конференция “Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Тезисы докладов. / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с., С. 142.
195. Носов В.В., Матвиян И.В., Зеленский Н.А., Ямилова А.Р. Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала// Моделирование, оптимизация и информацион-

ные технологии. Научный журнал, № 3(14) 2016. Полный текст статьи https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/NosovSoavtors_3_16_1.pdf

196. Носов В.В., Матвиян И.В., Зеленский Н.А., Ямилова А.Р. Неразрушающий контроль на основе использования параметров микромеханической модели акустической эмиссии// Территория NDT, № 1, 2017, с. 28-33.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

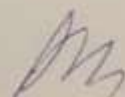
Утверждаю
Проректор по
образовательной деятельности
В.А. Шпенст
«23» 05 2017 г.

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационной работы
Зеленского Н.А. на тему: «Обоснование метода неразрушающего контроля
прочности элементов конструкций глубоководных сооружений на основе
использования явления акустической эмиссии» в Санкт-Петербургском
горном университете.

Полученные аспирантом Зеленским Н.А. результаты экспериментальных исследований акустической эмиссии и методика оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата используется с 1.09.2016 в лаборатории кафедры «Приборостроения» в учебном процессе по курсам «Физические основы акустического контроля» и «Контроль и диагностика машин, оборудования и подъемно-транспортных средств». Указанные результаты позволяют описать методику проведения акустико-эмиссионных испытаний, раскрыть суть неразрушающего прочностного контроля элементов глубоководных сооружений, описать основные особенности процесса разрушения сжимаемых элементов конструкций и принципы его прогнозирования, принципы оптимизации технологий неразрушающего контроля прочности.

Зав. каф. «Приборостроения»
Горного университета,
д.т.н., профессор



А.И.Потапов

522

Форма № 01 ИЗ-2014

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от -

Наш № 2016112868/28(020229)

*При перепечатке просим ссылаться на номер заявки и
сообщить дату получения настоящей корреспонденции
от 23.03.2017*

ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный
университет", отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий (отдел ИС и
ТТ)
21 линия, 2
В.О.
Санкт-Петербург
199106

**РЕШЕНИЕ
о выдаче патента на изобретение**

(21) Заявка № 2016112868/28(020229)

(22) Дата подачи заявки 04.04.2016

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что
заявленное изобретение
относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности,
сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с
полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)*, в связи с чем
принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 4 л. в 1 экз.

Заместитель руководителя

Документ подписан электронной подписью
Сведения о сертификате ЭП
Сертификат
2E3B6857000200000F94
Владелец Кирий
Любовь Леонидовна
Срок действия с 07.06.2016 по 01.04.2030

Л. Л. Кирий



*Проверка достаточности раскрытия сущности заявленного изобретения проводится по заявкам на изобретения, поданным после 01.10.2014.

7.8/72/

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2016112868/28(020229)

(22) Дата подачи заявки 04.04.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента 04.04.2016

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 04.04.2016

(72) Автор(ы) Носов В.В., Зеленский Н.А., Матвеев И.В., Ямилова А.Р., RU

(73) Патентообладатель(и) федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет", RU

(54) Название изобретения СПОСОБ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНОГО КОРПУСА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

(см. на обороте)

01	1	280204
----	---	--------

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.

(21) 2016112868/28

(51) МПК
G01N 29/14 (2006.01)

- (57) Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата, включающий нагружение исследуемого объекта и регистрацию числа импульсов акустической эмиссии (АЭ) и их амплитуды, определение диагностических параметров, связанных со степенью опасности дефектов, сравнение основного диагностического параметра с его критическим значением для определения степени опасности источника импульсов АЭ, отличающийся тем, что нагружение, необходимое для инициирования сигналов АЭ, производят по окружностям определенного диаметра или линиям определенной длины в направлении минимальной оси кольцевого сечения с двух взаимно противоположных сторон до напряжений ниже предела текучести материала, а контроль прочности производят посредством определения на основе регистрации числа импульсов АЭ или суммарной амплитуды сигналов АЭ диагностического параметра W_{AE} , значение которого связано со степенью опасности дефектов, временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p , где W_{AE} определяется по формуле

$$W_{AE} = \frac{d \ln(\xi)}{dK_n} = Y_{AE} \cdot \sigma,$$

где ξ - информационный параметр, в качестве которого используют число N_Σ импульсов АЭ или суммарную амплитуду сигналов АЭ, накопленных на этапе однородного разрушения;

Публиковать с фиг. № 1

Приложение № 1

К заявке № 2016112868/28

(54) СПОСОБ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНОГО
КОРПУСА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Реферат

(57) Использование: для оценки прочности элементов сварного корпуса подводных аппаратов сферической и кольцевой формы на основании акустического метода неразрушающего контроля. Сущность изобретения заключается в том, что осуществляют нагружение исследуемого объекта, регистрацию числа импульсов акустической эмиссии (АЭ) и их амплитуды, определение диагностического параметра W_{AE} , связанного со степенью опасности дефектов, временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p , и его сравнение с критическим значением $[W_{AE}]$ для определения степени опасности источника импульсов АЭ и работоспособности контролируемого объекта. Также данный способ оценки прочности позволяет производить оценку остаточного ресурса $N_{ост}$. Технический результат: повышение точности контроля прочности кольцевых и сферических элементов сварного корпуса подводного аппарата. 6 ил., 2 табл.

Референт Ирицкий Е.В.

При публикации сведений о выдаче патента будут использованы описание в первоначальной редакции и первоначальные чертежи.

Приложение:

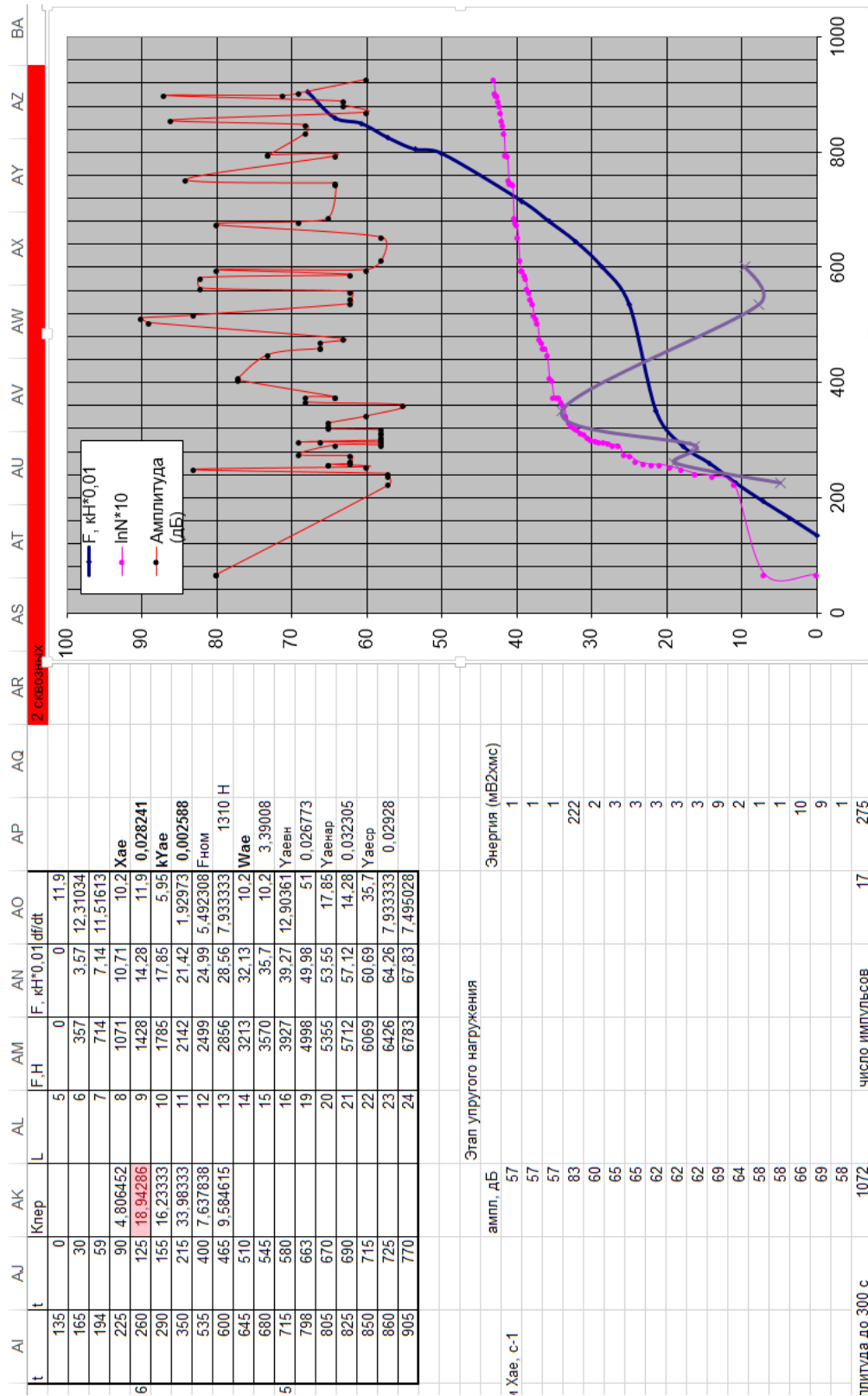
1. Реферат, скорректированный экспертизой, на 1 л. в 1 экз.

Главный государственный
эксперт по интеллектуальной
собственности отдела
измерительной техники
ФИПС

Документ подписан электронной подписью
Сведения о сертификате ЭП
Сертификат 5727C1E8000200000FC7
Владелец Ирицкий
Евгений Вячеславович
Срок действия с 15.06.2016 по 01.04.2030

Е. В. Ирицкий
8(499)243-94-01

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ АЭ СЖИМАЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ОБРАЗЦОВ



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80																				

