

2 9 0 8 0 2 5

На правах рукописи

УДК 620.179.16

ХЛЫБОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

**ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В
КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ
АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность:

05.02.11 - Методы контроля и диагностика в машиностроении

А в т о р е ф е р а т

диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук



Нижний Новгород

2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО Нижегородский государственный технический
университете им. Р.Е.Алексеева

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бигус Георгий Аркадьевич

доктор технических наук, профессор
Вопилкин Алексей Харитонович

доктор технических наук, профессор
Иванов Валерий Иванович

Ведущее предприятие: **Нижегородский филиал Института
машиноведения им. А.А.Благодрава РАН
(г. Н.Новгород)**

Защита состоится «15» декабря 2011 года на заседании диссертационного
Совета Д212.141.01 в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью организации, просим
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «11» января 2011 года.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1988029

Хлыбов А.А. Оценка накоплен

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

Актуальность темы. Одной из основных задач развития современного машиностроения, является обеспечение безопасной эксплуатации конструкций, как в целом, так и отдельных элементов. По причине выработки ранее назначенного ресурса актуальной является задача продления срока службы конструкций, находящихся в эксплуатации. В реальных условиях эксплуатации металлические конструкции подвергаются воздействию различных температур, коррозионных сред, статических, динамических и циклических нагрузок, радиационного облучения. Длительный срок службы приводит к проявлению в разные периоды эксплуатации различных механизмов деградации материала, инкубационные периоды которых протекают скрытно. Это приводит к изменению физико-механических характеристик металла. Кроме того, в конструкции всегда присутствуют дефекты, полученные при изготовлении, транспортировке и т.д. Постепенно развивающиеся неконтролируемые процессы деградации приводят к зарождению и развитию микроскопических трещин, к внезапным отказам и разрушению конструкции. Предельные состояния материала машин и сооружений становятся зависимыми от искажения структуры, от постепенного накопления дефектов в процессе эксплуатации. Оценки текущего состояния материала конструкции с помощью расчетов могут различаться из-за неопределенности исходных данных и выбора методик расчета и т.д. Поэтому необходима надежная оценка текущего состояния материала конструкций, как на этапе проектирования и изготовления, так и в процессе эксплуатации.

Такая оценка возможна в том случае, если ее рассмотрение осуществлять с точки зрения синтеза различных научных подходов, применяемых в материаловедении, механике деформируемого твердого тела, механике разрушения и методов неразрушающего контроля. Для этого необходимо: а) построение физико-механических моделей описания среды с повреждениями, б) разработка практических методик оценки накопленных повреждений. Вопрос о количественной оценке поврежденности материала в реальных конструкциях остается открытым. Очевидно, для адекватного описания поведения материалов под нагрузкой необходим учет эволюции реальной дефектности. В связи с этим, разработка методик количественной оценки структурных изменений в твердом теле и исследование общих закономерностей кинетики нако-

пления повреждений становится необходимым звеном в решении актуальной задачи идентификации реальной дефектности.

Особую роль в задачах оценки степени повреждения структуры играет диагностика, использующая методы неразрушающего контроля. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля следует признать акустические методы, обладающие высокой чувствительностью, универсальностью, экономичностью. Это объясняется тем, что упругие волны реагируют на все происходящие в контролируемой среде процессы, выполняют функции универсального датчика, поставляющего сведения о контролируемой среде. Это вполне естественно, так как параметры упругих волн зависят от плотности, модулей упругости, размера и геометрии структурных неоднородностей и других характеристик исследуемой среды.

Однако примеры практического применения акустических методов в задачах количественной оценки накопления повреждений являются частными случаями контроля. Имеющиеся методические разработки во многих случаях носят качественный характер, основываются на сравнении с эталоном. Поэтому получение достоверной информации, применение ее для оценки текущего состояния материала и возможность прогнозирования поведения конструкции на ближайший период эксплуатации остается актуальной задачей. Для задач контроля состояния материала конструкций требуется проведение новых исследований по расширению возможностей методов контроля, необходима разработка новых методик, способствующих повышению достоверности результатов измерений.

Целью настоящей работы явилось: разработка и обоснование применения акустических методов для определения стадий и количественной оценки поврежденности конструкционных материалов при силовом, радиационном и термическом воздействии на основе выявленных закономерностей изменения характеристик контролируемого материала и параметров упругих волн.

Для достижения поставленной цели потребовалось:

- Исследовать и систематизировать данные о влиянии усталостного нагружения, термического и радиационного воздействий на структуру, механические и акустические свойства конструкционных металлических материалов и установить соответствующие корреляционные соотношения.
- Провести анализ возможностей существующих методов и средств неразрушающего контроля в задачах оценки степени деградации конструкционных металлических материалов. Обосновать выбор измеряемых акустиче-

ских характеристик, чувствительных к процессам деградации исследуемых конструкционных материалов.

- Проанализировать модели, описывающие процесс накопления повреждений в материале и обосновать выбор феноменологической модели, параметры которой могут быть измерены акустическими методами.

- Проанализировать влияние режимов нагружения на акустико-эмиссионные характеристики исследуемых материалов и обосновать применение акустической эмиссии для обнаружения и контроля критических мест в конструкции.

- Проанализировать возможность использования полученных результатов исследований в задачах контроля повреждений в конструкционных материалах акустическими методами и проверить работоспособность предложенных алгоритмов контроля на длительно эксплуатируемых промышленных объектах.

Методы исследования. Все задачи диссертационных исследований решены на основе применения апробированных и корректных методов: механических испытаний, металлографического анализа, рентгеноструктурного анализа, контроля твердости, измерения плотности, термической обработки сталей, прецизионных акустических и акусто - эмиссионных (АЭ) измерений. При оценке работы реальных конструкций использовались экспериментальные данные, полученные на образцах и крупномасштабных моделях и натурных объектах в условиях нормальной эксплуатации для данного типа конструкции. При обработке данных, расчетах, математическом моделировании использовались оригинальные и стандартные пакеты вычислительных программ (MathCAD, MatLAB). Для анализа металлографических изображений использовалась программа «Spectrmet».

Экспериментальные исследования проводились с применением стандартных механических испытаний (растяжение, сжатие, усталость, длительная прочность) на образцах из конструкционных металлических материалов. Нагружение осуществлялось на серийных испытательных машинах, специально изготовленных стендах и натурных объектах.

Объектами исследования служили конструкционные металлические материалы, которые используются в атомной, химической, авиационной, судостроительной и нефтегазовой промышленности. Исследованию подвергались материалы с различной исходной структурой в состоянии, характерном для реальных конструкций в начальный период эксплуатации, а также после

различных видов воздействия: термообработки (закалка, отпуск, отжиг), внешних механических нагрузок, радиационного облучения.

Научная новизна проведенных в диссертации исследований заключается в создании научных основ для оценки накопленных повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами:

1. Установлено влияние деградации конструкционных металлических материалов на параметры упругих волн. Полученные корреляционные соотношения использованы для создания методик количественной оценки поврежденности и механических характеристик металлов.

2. Впервые разработана математическая модель влияния состояния поверхностного слоя на параметры поверхностных волн, использование которой позволяет оценивать состояние материала конструкции на более ранней стадии разрушения.

3. Научно обоснован и разработан комплексный интегральный акустический критерий оценки поврежденности (предельного состояния) длительно – работающего металла.

4. Проанализированы модели накопления рассеянных повреждений в материале. Дано экспериментальное обоснование использования акустического метода для измерения накопления рассеянных микроповреждений.

5. Определены особенности зависимости параметров акустической эмиссии (АЭ) от напряжений и деформаций при различных скоростях нагружения. Дано обоснование технических требований для использования АЭ в задачах поиска критических мест в крупногабаритных конструкциях.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении научно обоснованных инженерных методик и подходов для контроля накопления повреждений в материалах длительно эксплуатируемых конструкций:

- Обоснован оптимальный выбор параметров упругих волн, обеспечивающий наибольшую чувствительность и позволяющих с высокой точностью и достоверностью контролировать необратимые процессы, протекающие в материале конструкций.

- Разработано программное обеспечение и разработана модификация прибора, позволяющие производить оценку физико-механических характеристик, поврежденности материала и напряженного состояния непосредственно на конструкции, без ее разрушения.

- Разработана и внедрена методика определения критических мест в конструкции при статических испытаниях экранопланов по параметрам сигналов акустической эмиссии.

- Разработана методика оценки поврежденности (предельного состояния) длительно – работающего металла акустическим методом.

- Разработана и апробирована (на образцах свидетелей и темплетях) методика оценки деградации материала корпуса реактора типа ВВЭР, подвергаемого радиационному воздействию.

- Разработана и внедрена в практику методика оценки внутренних напряжений, возникающих при термической обработке различных деталей.

- Разработана и утверждена методика для определения механических характеристик материала на элементах конструкций без их разрушения.

Достоверность работы подтверждается совпадением результатов теоретического прогноза с полученными экспериментальными данными, сравнением полученных результатов с результатами других авторов, сравнением экспериментальных данных с экспериментальными данными, полученными с использованием других методов исследований (рентгеновский, тензометрирование).

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- Результаты исследования физико-механических характеристик в условиях усталостного нагружения, радиационного облучения и термической обработки конструкционных металлических материалов.

- Результаты исследований влияния процессов деградации конструкционных металлических материалов на акустические свойства среды.

- Акустический критерий оценки накопленных повреждений при усталостном и радиационном воздействиях.

- Модель, учитывающая влияние процессов деградации поверхностного слоя на параметры поверхностных волн.

- Результаты АЭ экспериментальных исследований, позволяющих определить критические места в конструкции при статическом нагружении.

- Результаты практического использования акустических методов контроля на промышленных объектах.

- Разработка и внедрение инженерных методик контроля механические характеристики материала, как на образцах, так и на элементах конструкций, без нарушения их эксплуатационных и прочностных характеристик.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены: в ЦКБ по судам на подводных крыльях имени Р.Е.Алексеева, (г. Н.Новгород), на ОАО «Нижегородский металлургический завод», на ОАО «Синтез» (г. Дзержинск, Нижегородской области), на Смоленской, Калининской, Курской АЭС, в ОКБМ им. Африкантова (г. Н.Новгород).

После проведения дополнительных исследований круг контролируемых материалов и конструкций может быть существенно расширен.

Использование результатов работы в учебном процессе. Разработки используются при чтении курса «Механические свойства», «Материаловедение», а также при выполнении выпускных квалификационных работ бакалавров, специалистов и магистров по направлению 150600 «Материаловедение и технологии новых материалов» факультета материаловедения и высокотемпературных технологий НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических семинарах и конференциях: секции № 5 «Надежность, безопасность, ресурс и живучесть оборудования и трубопроводов атомных станций» НТС № 1 Федерального агентства по атомной энергии, 28.03.2007 г.; на научно-техническом семинаре ОКБМ им. Африкантова, январь 2009 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве» (23-26 октября 2006 г. - Н.Новгород, НГТУ); IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (22-28 августа 2006 г, Н.Новгород, ННГУ); Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы машиноведения: новые технологии и материалы» (Н.Новгород, 2006 г); II всероссийской научной конференции по волновой динамике машин и конструкций (Н.Новгород, 28-31 октября 2007 г); VII международной конференции «Не разрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности (Москва, 11-13 марта 2008 г); межрегиональной научно-практической конференции «Заготовительные производства и материаловедение», посвященная 100 – летию проф. А.А. Рыжикова (Н.Новгород, НГТУ, 19-21 марта 2009 г); 8 -й международной конференции «Не разрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 18-20 марта 2009 г); первой Всероссийской конференции «Проблемы механики и акустики сред с микро и наноструктурой: НАНОМЕХ-2009 (Н.Новгород, 2009 г), Всероссийской научной школе для молодежи «Проблемы старения и ресурса сталей магистральных

трубопроводов» (Н. Новгород, 21-22 сентября 2010 г); на заседании кафедры «Технологии сварки и диагностики» Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана.

Результаты работы отражены в отчетах по гранту РФФИ 09-08-00601-а «Исследование влияния радиационного облучения на акустические характеристики конструкционных материалов и разработка методики контроля механических характеристик»; по договорам с промышленными предприятиями: ЦКБ по СПК имени Р. Е. Алексеева (г. Н.Новгород), ОАО «Нижегородский металлургический завод», ОАО «Синтез» (г. Дзержинск), концерн «Росэнергоатом», ФГУП «ОКБМ» им. Африкантова (г. Н.Новгород).

Публикации. Основные результаты проведенных исследований отражены в 40 публикациях. Основные работы представлены в 2 монографиях, в 16 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, получено два авторских свидетельства и патент на изобретение.

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты исследований, полученные автором самостоятельно, а также в совместных работах. При этом лично автору принадлежат выбор направления исследования, постановка задач, программа и методология исследования, организация, проведение, обработка и обобщение экспериментальных исследований, построение математических моделей и установление закономерностей, разработка и внедрение результатов на промышленных предприятиях. Участие соавторов работ отражено в совместных публикациях, за что автор выражает им искреннюю благодарность. Автор диссертации выражает благодарность доктору технических наук Углову А.Л. за помощь, оказанную при постановке задачи, постановке экспериментов и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и списка литературы из 343 наименований, приложений, изложена на 394 страницах, включая 44 таблицы и 189 рисунков.

Содержание работы.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также перспективы дальнейшего развития проблемы диагностики поврежденных структур.

Глава 1. «Физико-механические представления о поврежденности поликристаллических материалов. Методы исследования структурных изменений в конструкционных металлических материалах».

В конструкционных материалах, при воздействии статических и переменных, нагрузок протекают необратимые и непрерывные изменения структуры, которые физически интерпретируются как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов. Существует критическая концентрация микродефектов при достижении которой наблюдается массовый рост повреждений, разуплотнение материала (до 3%), зарождается макротрещина. При этом в поверхностном слое металла глубиной порядка размера зерна процесс накопления повреждений протекает более ускоренно по сравнению с объемом. Большой вклад в исследование структурного состояния сплавов при статическом и усталостном нагружении внесли отечественные ученые В.И. Владимиров, С.Н. Журков, В.С. Иванова, И.А. Одинг, В.А. Петров, В.Е. Панин, В.Р. Регель, В.А. Степанов, В.Ф. Терентьев, В.Т. Трощенко, В.А. Скуднов, В.М. Финкель и другие, а также зарубежные ученые А.Н. Cottrell, E. Orowan, N.E. Mott, A.N. Stroh, C. Zener, P. Hirsch и другие.

Анализ данных показывает, что при температуре ниже $0,5 T_{пл}$ и интенсивности потока нейтронов $\Phi > 10^{17}$ нейтронов/см² наблюдается низкотемпературное радиационное охрупчивание: повышение температуры хрупко-вязкого перехода и снижение относительного удлинения, поперечного сужения, ударной вязкости. Протекающие структурные изменения приводят к снижению пластических и повышению прочностных характеристик. Вопросы радиационного охрупчивания рассматриваются в работах А.Д. Амаева, И.В. Горынина, В.Ф. Зеленского, Ю.К. Конобеева, А.Н. Лапина, И.М. Неклюдова, А.М. Паршина, В.В. Рыбина, и др.

Для описания поведения реальных поликристаллических материалов существуют различные модели, ключевым понятием которых служит поврежденность материала. основополагающими являются работы Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова, В.В. Болотина, в которых в качестве меры поврежденности используют параметр внутреннего состояния Ψ . Физический смысл Ψ зависит от используемой модели, например, это может быть разуплотнение материала, концентрация микродефектов: поры, микротрещины, включения.

Для оценки степени поврежденности структуры материала в задачах диагностики используются методы неразрушающего контроля. Значительный

интерес представляют акустические методы контроля, которые в настоящее время широко используются в промышленности при решении задач традиционной дефектоскопии. Следует признать перспективность акустических методов в задачах, связанных с изучением процессов, протекающих на микроуровне. В работах Н.П. Алешина, А.А. Ботаки, А.С. Вавакина, А.Н. Гузя, М.А. Криштала, С.К. Канауна, И.М. Лифшица, Л.Г. Меркулова, Г.Д. Пархомовского, Р.Л. Салганика, А.Л. Углова, В.В. Мишакина, Н.Е. Никитиной, А.В. Шарко, Ф.Г. Махорта, R. Truell, C. Elbaum, B.B. Chick, W.P. Mason теоретически и экспериментально показана чувствительность основных параметров упругих волн (коэффициентов затухания и скорости ультразвука, дисперсии скорости) к особенностям структуры материала. Следует подчеркнуть, что для оценки механических характеристик среды с повреждениями и моделирования распространения упругих волн в этой среде используется один и тот же математический аппарат. Выводы работ, посвященных распространению упругих волн в среде с повреждениями могут служить основой для построения комплексного акустического метода определения физико – механических характеристик реальных, поврежденных конструкционных материалов. При определении механических напряжений акустический метод признается одним из перспективных, особенно в тех случаях, когда привести объект в исходное ненапряженное состояние невозможно.

Из акустических методов следует выделить метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и анализе упругих волн, излучаемых твердым телом в процессе разрушения или перестройки внутренней структуры. Метод АЭ относится к прямым методам измерения дефектности в том смысле, что каждому коллективному акту повреждения структуры материала соответствует первичный упругий импульс. Тем не менее, применение АЭ для определения количественной меры поврежденности в мировой практике отсутствует, имеющиеся результаты обычно носят качественный характер.

Проблема прогнозирования поведения характеристик металлов с различной поврежденностью структуры при различных воздействиях (в том числе и по природе: механические, термические, радиационные) является актуальной. Существуют различные научные подходы к проведению исследований процессов, протекающих в материалах. Устанавливаемые закономерности поведения материала с повреждениями зависят от случайного сочетания многих факторов и параметров состояния, часто не предсказуемы. Для решения прикладных задач, а именно для обеспечения безопасной эксплуатации

технических объектов необходимо обеспечить количественную оценку и правильную идентификацию накопленных фактических повреждений в конструкционных материалах на всех этапах деградации материала. Это определило цель и задачи данной работы.

Глава 2. «Анализ структурных изменений в материале и разработка метода оценки накопления повреждений в конструкционных металлических материалах».

Конструкционные металлические материалы представляют собой микронеоднородную среду. Структура металлов состоит из зерен, включений, мартенсита, карбидов, нитридов, пор, микротрещин и т.д. Размеры, ориентация, количественное соотношение между фазами структурных фрагментов являются случайными. Для описания поведения таких материалов используют эффективные характеристики. К числу физико-механических характеристик, чувствительных к нарушениям сплошности можно отнести эффективные модули упругости ($E_{зф}$, $G_{зф}$), определяемые через поврежденность Ψ .

$$E_{зф} = E(1 - \Psi), \quad G_{зф} = G(1 - \Psi), \quad (1)$$

где: E – начальное значение модуля Юнга, МПа;

G – начальное значение модуля сдвига, МПа.

Анализ закономерностей распространения упругих волн в микронеоднородной среде с микроповреждениями показал, что параметры упругих волн зависят от поврежденности среды. Результаты этих работ могут быть использованы в задачах акустического метода определения поврежденности контролируемой среды.

Частотно зависимый коэффициент затухания $\alpha(\omega)$ может быть связан с характеристиками поврежденности Ψ материала следующим образом:

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2 \Psi) \omega^4, \quad (2)$$

Скорость распространения $V_i(\omega)$ может быть записана:

$$V_i(\omega) = V_i^0(1 - k_3 \Psi \omega^2), \quad (3)$$

где: ω – частота упругих волн, c^{-1} , индекс $i = 1, 2$ – соответствует сдвиговой волне, с вектором поляризации вдоль и поперек действия нагрузки, соответственно, $i = 3$ – соответствует продольной волне;

k_1, k_2, k_3 – характеристики материала, определяемые экспериментально на образцах из контролируемого материала;

V_i^0 – начальная скорость, м/с.

Решена задача распространения плоских гармонических волн (поверх-

ностных волн Рэлея) частотой ω в упругом полупространстве с микроповреждениями. В поверхностной волне практически вся энергия волны сосредоточена в поверхностном слое толщиной порядка $2\lambda_p$, где λ_p - длина поверхностной волны. При решении задачи были использованы представления о том, что: а) в поверхностном слое наблюдается ускоренный (опережающий) рост повреждений по сравнению с внутренними объемами материала, б) на стадии накопления рассеянных микроповреждений размеры микроповреждения малы, форма микроповреждений - сферическая, микроповреждения не взаимодействуют друг с другом. Концентрация микроповреждений N_z зависит от расстояния z до поверхности:

$$N_z = N_\infty + (N_0 - N_\infty \exp(z/z_0)), \quad (4)$$

где N_∞ - концентрация микроповреждений в глубине образца, N_0 - концентрация микроповреждений у поверхности, z_0 - толщина поврежденного поверхностного слоя.

Среда с повреждениями может быть описана с помощью эффективных динамических модулей упругости являющихся функциями координат.

Получено характеристическое уравнение:

$$4k^2 \left[S(1 + \bar{\alpha}) + \frac{\bar{\alpha}}{z_0} \right] \cdot \left[R(1 + \bar{b}) + \frac{\bar{b}}{z_0} \right] - \left\{ (S^2 + k^2) \cdot (1 + \bar{\alpha}) + \frac{S\bar{\alpha}}{z_0} + \frac{\bar{\alpha}}{z_0^2} \right\} \cdot \left\{ (S^2 + k^2) \cdot (1 + \bar{b}) + \frac{R\bar{b}}{V_{1.2}^2} + \frac{\bar{b}}{z_0^2} \right\} = 0 \quad (5)$$

где:

$$S^2 = k^2 \left(1 - \frac{V_R^2}{V_{1.2}^2} \right), \quad R^2 = k^2 \left(1 - \frac{V_R^2}{V_2^2} \right),$$

V_R - скорость поверхностной волны,

k - неизвестное волновое число,

$\bar{b}$, $\bar{\alpha}$ величины, характеризующие поврежденность материала, зависят от различия характеристик (плотность, модули упругости) материала в поверхностном слое и в глубине.

В частном случае однородной среды ($\bar{\alpha} = 0, \bar{b} = 0$) уравнение (5) совпадает с характеристическим уравнением Рэлея:

$$4k^2 SR - (k^2 + S^2)^2 = 0. \quad (6)$$

В однородной среде скорость распространения поверхностной волны вдоль плоской границы не зависит от частоты, определяется из решения уравнения 6. Поврежденность (уравнение 5) приводит к появлению диспер-

сии - зависимости скорости от частоты распространяющейся волны. С ростом поврежденности материала скорость волны уменьшается, затухание увеличивается (случай рассеивания упругих волн на микротрещинах), увеличивается глубина проникания поверхностных волн. На низких частотах влияние поврежденности на скорость распространения меньше. В случае, когда длина волны больше толщины поврежденного слоя, зависимость скорости от частоты близка к линейной.

Показана возможность использования поверхностных волн в задачах диагностики для двух предельных значений частот используемых поверхностных волн:

- Длина волны меньше толщины поврежденного слоя, то контролируется только поверхностный слой. Текущая поврежденность определяется через изменение затухания $\Psi = \frac{\Delta\gamma_t}{\Delta\gamma_p}$ или изменение скорости поверхностных волн. Где $\Delta\gamma_t = \gamma_t - \gamma_0$ - изменение коэффициента затухания поверхностных волн за время от начала их испытаний до момента определения наработки материала. $\Delta\gamma_p = \gamma_p - \gamma_0$ - изменение коэффициента затухания поверхностных волн в тарировочных образцах за время от начала испытаний до их разрушения. Выражение для определения остаточного ресурса (многоцикловая усталость) при известной истории нагружения запишется:

$$N_{\text{ост}} = \frac{c}{\sigma^m} \left(1 - \frac{\Delta\gamma_t}{\Delta\gamma_p} \right)^{m+1-\alpha}, \quad (7)$$

где: c , m , α - экспериментально определяемые характеристики материала.

- В контролируемом материале, с толщиной поврежденного слоя z_0 возбуждается две волны на частотах ω_1 и ω_2 . Причем длина волны λ_R^1 на частоте ω_1 удовлетворяет условию: $\lambda_R^1 \leq z_0$. Для второй волны, частота ω_2 выбирается из условия: $\lambda_R^2 > z_0$. При этих условиях на частотах ω_1 , ω_2 контролируем разные толщины, в которых процесс накопления повреждений протекает с разными скоростями. Функция повреждений Ψ_1 для тонкого поверхностного слоя, контролируемого на частоте ω_1 , меняется быстрее, чем Ψ_2 . Для низкой частоты ω_2 происходит более медленное изменение параметров поверхностных волн по сравнению с изменением на высокой частоте ω_1 . Критическая плотность повреждений имеет одно и то же значение, как для тонкого поверхностного слоя, так и для глубинных слоев. Поэтому моменту разруше-

ния (появление макротрещины) будут соответствовать одинаковые значения Ψ_1 и Ψ_2 . Следовательно, время разрушения можно будет определять, сравнивая значения Ψ_2 с ранее достигнутым критическим значением повреждений в поверхностном слое Ψ_1 . Условие для времени появления макротрещины в объеме материала можно записать в виде: $\Psi_1 = \Psi_2$. Оценка долговечности производится сравнением результатов измерений медленно накапливающихся повреждений в толщине всего образца с повреждениями в поверхностном слое. Алгоритм двухчастотного определения усталостного повреждения может представлять интерес в задачах, когда неизвестна предыстория циклического нагружения. На данный метод получено авторское свидетельство.

Материалы с дефектами типа трещин, пустот приводят к уменьшению упругих модулей и скоростей распространения. Для усталостных (длительная прочность, ползучесть) процессов, связанных с зарождением и накоплением микротрещин поврежденность определяется:

$$\Psi \approx -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = v_\Psi N_\Psi / \rho_0, \quad (8)$$

где N_Ψ - концентрация микропор, микротрещин, включений; v_Ψ - средний объем поры; $\Delta\rho$ - изменение плотности, ρ_0 - плотность материала в отсутствии повреждений.

Жесткие включения (карбиды, нитриды), их образование дают увеличение эффективных упругих характеристик (1), приводят к росту скоростей распространения упругих волн. Радиационное облучение приводит к росту скоростей упругих волн.

Из соотношений (2, 3) с точностью до постоянных может быть определена величина Ψ . Частотно-зависимое затухание обычно используется при измерении структурных неоднородностей, например размера зерна, пористость. При измерении затухания упругих волн $\alpha(\omega)$ ошибка измерений может достигать более 10%. Такая низкая точность во многом зависит от постановки эксперимента: установка датчиков, контактная жидкость, шероховатость поверхности и т.д. Для определения Ψ предлагается использовать скорость распространения упругих волн, так как в этом случае обеспечивается большая точность, надежность, повторяемость результатов. Ошибка измерения скорости объемных волн в лабораторных образцах равна 0.05%. Изменение скорости в рассматриваемых задачах накопления повреждений около 1%. Погрешность измерения скорости в основном определяется точностью измерения толщины образца. Кроме того на реальной конструкции измерение толщины

является практически не выполнимой задачей. Проведение дополнительных измерений времени распространения упругих волн позволяет строить алгоритм определения поврежденности, используя только измерения времени распространения (задержек) сдвиговых волн (t_1 и t_2), поляризованных вдоль и перпендикулярно направлению действия нагрузки, продольных (t_3) и поверхностных (t_R) волн.

За величину критерия поврежденности материала принято:

$$\Psi_A = \alpha_D \frac{D_t - D_0}{D^* - D_0} + \alpha_R \frac{t_R^t - t_R^0}{t_R^* - t_R^0} + \alpha_A \frac{A_t - A_0}{A^* - A_0} + \alpha_1 \frac{D1_t - D1^0}{D1^* - D1^0} + \alpha_2 \frac{D2_t - D2^0}{D2^* - D2^0} \quad (9)$$

где: индекс $t, 0, *$ - соответствует текущему (в момент измерения), начальному и критическому (предельному) состоянию, соответственно;

$\alpha_D, \alpha_R, \alpha_A, \alpha_1, \alpha_2$ - некоторые, определяемые экспериментально, весовые коэффициенты, зависящие от вида, количества используемых упругих волн, материала контролируемого элемента;

t_R^t - время распространения поверхностных волн.

Коэффициент D принимает следующие значения:

$$D = D1 + D2, \quad (10)$$

$$\text{где: } D1 = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right) * 10^4,$$

$$D2 = \left(\frac{t_2}{t_3} - 1 \right) * 10^4,$$

$$A = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right) * 10^4. \quad (11)$$

Физический смысл критерия заключается в соотношении изменения текущих акустических параметров с абсолютным диапазоном изменения этих параметров. Каждый из слагаемых, входящих в выражение (9) в процессе нагружения (эксплуатации) меняется по различным законам.

Данный критерий поврежденности материала допускает использование также одного или двух типов упругих волн. При контроле усталостного разрушения, структурно-чувствительный параметр, использующий поверхностные волны, достигает своего максимального значения $\Psi_{\max} = 1$ в поверхностном слое при наработке 60 – 70% от долговечности всего материала.

Для измерения поврежденности, основанной на измерении скорости (времени) распространения упругих волн, разработана с участием автора, модификация измерительно-вычислительного комплекса "АСТРОН".

Для оценки напряженного состояния элементов конструкций используются уравнения акустоупругости, связывающие главные напряжения σ_1 и σ_2 с акустическими задержками импульсов упругих волн:

$$\sigma_1 = k_1 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right) - k_2 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right), \quad (12)$$

$$\sigma_2 = k_3 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right) - k_4 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right), \quad (13)$$

$$\text{где } d_1 = \frac{t_1}{t_a}, \quad d_2 = \frac{t_2}{t_a}, \quad d_1^0 = \frac{t_1^0}{t_a^0}, \quad d_2^0 = \frac{t_2^0}{t_a^0},$$

t_1, t_2 - задержка сдвиговых волн, распространяющихся в напряженном материале с векторами поляризации, ориентированными соответственно вдоль главных напряжений, с,

t_3 - задержка продольной волны, распространяющейся в напряженном материале, с,

t_1^0, t_2^0, t_3^0 - соответствующие значения задержек для ненапряженного материала объекта контроля, с,

коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 определяются в ходе тарировочных экспериментов на растяжение образцов из контролируемого материала.

Химический состав, режим термической обработки стали оказывает существенное влияние на скорость упругих волн. Скорость упругих волн с увеличением содержания углерода возрастает. Наибольшее влияние на скорость оказывают структурные изменения. Для углеродистых сталей скорость будет максимальной после отжига, минимальной после закалки. Причем разность скоростей в закаленном и отожженном состояниях увеличивается с увеличением содержания углерода. Значение скорости ультразвука при термической обработке меняется в пределах от 0 до 2 % от номинала, определяемого соотношением $v \approx (E/\rho)^{1/2}$. Легирование сталей приводит к изменению скоростей упругих волн. Эти изменения могут быть определены в соответствии с закономерностями изменения плотности и модулей упругости.

Глава 3. «Техническое обеспечение и методика проведения исследований в задачах контроля повреждений и физико-механических характеристик в конструкционных материалах».

В работе исследовались стали: 12X18H10T, 08X18H10T, 15X2MФА, 15X2HMFА, 6ХС, Ст15ХСНД, 09Г2С, 5ХНВС, 30ХГС, сталь 35; титановый сплав ВТ3-1; алюминиевый сплав АМг61. Образцы для проведения механи-

ческих испытаний и акустических исследований были изготовлены по соответствующим ГОСТам. Образцы вырезались из листового проката, прутков, поковых, труб в состоянии поставки. Для исключения влияния краевых эффектов на результаты акустических измерений ширина рабочей части плоских образцов должна быть больше трех диаметров датчика.

Исходными данными для составления программы испытаний служили результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные, полученные на натурных объектах.

Для проведения акустомеханических экспериментов были использованы серийные испытательные машины, а также специальный рычажный стенд для создания постоянных нагрузок и вибростенды для испытания образцов на много- и малоцикловую усталость на базе ОКБМ, НГТУ, ВГАВТ, ЦКБ по судам на подводных крыльях. Для испытаний экранопланов использовались специальные стенды для статических и ресурсных испытаний (ЦКБ по СПК, опытный завод «Волга», Чкаловский филиал ЦКБ по СПК). Проверка работоспособности алгоритмов определения ресурсных характеристик экранопланов проводилась на стендах завода «Волга», в процессе опытной эксплуатации экранопланов (Каспийск, Дагестан).

Акустические исследования проводились с использованием ИВК «АСТРОН», предназначенного для прецизионных измерений амплитудных, временных и частотных характеристик упругих волн. В основу работы ИВК положен способ подробной регистрации отраженных акустических импульсов с их последующей обработкой специально разработанным программным обеспечением. ИВК «АСТРОН», позволяет проводить измерения задержек с точностью $2 \cdot 10^{-9}$ с, затухания (погрешность измерения 4%) в диапазоне частот 1-30 МГц. По результатам измерения параметров упругих волн определяются величины, входящие в диагностический критерий поврежденности (9). Программное обеспечение: решает задачи первичной обработки информации о параметрах упругих волн, определяет физико-механические характеристики материалов, а также включает базу данных по исследуемым материалам, конструктивным элементам, условиям эксплуатации.

В процессе экспериментов измерялись толщина образцов, твердость, проводился рентгеноструктурный анализ (ДРОН-2), измерения плотности методом гидростатического взвешивания (с точностью 0,05%). Методы металлографии использовались для определения параметров структуры и оценки величины зерна и степени его однородности по размерам. Изучение микро-

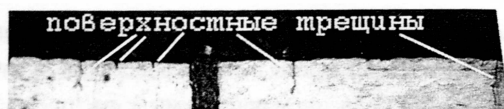
структуры проводилось на оптическом микроскопе, увеличение 100-1000, с применением цифрового фотографирования. Количественная оценка проводилась с использованием программы «Spectrmet 4.5.5».

Оценка степени радиационного охрупчивания материала корпуса ядерного реактора, образцов - свидетелей проводилась в горячей камере Российского научного центра «Курчатовский институт» (г. Москва), ФГУП «Прометей» (г. С.Петербург).

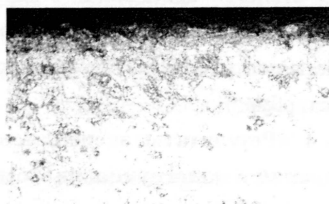
Глава 4 «Результаты экспериментальных исследований накопления повреждений в конструкционных металлических материалах».

Испытания на малоцикловую усталость. На образцах из стали 08X18N10T длиной рабочей части 40 мм и диаметром рабочей части 12 мм исследованы закономерности накопления повреждений при малоцикловой усталости. Условия проведения испытаний: симметричный цикл, жесткое изотермическое нагружение с постоянной амплитудой пластической деформации (0,6% - 0,1%), скорость деформирования рабочей части образца составляла $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, температура испытаний $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$.

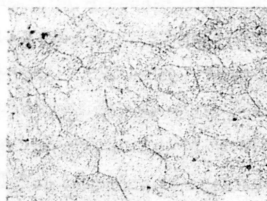
Результаты гидростатического взвешивания показали, что плотность стали уменьшается: неповрежденное состояние 7920 кг/м³, в зоне разрушения 7730 кг/м³. Микроструктура в исходном состоянии – аустенит (рис. 2), в процессе усталостного разрушения появляется мартенсит деформаций. При разрушении на шлифах можно выделить карбиды, Ni₃Ti. Обнаружено появление магнитных свойств. На поверхности образца видны множественные поверхностные микротрещины (рис. 1, рис. 2а). Наблюдается упрочнение материала: предел текучести с начальных 200 МПа увеличивается до 760 МПа для $\Delta\epsilon = 0,3$. Между механическими и акустическими характеристиками существует однозначное соответствие. По результатам измерений скоростей (задержек) продольных, сдвиговых и поверхностных волн определялись: поврежденность материала и механические характеристики. Результаты данных исследований подтверждают то, что процессы накопления повреждений приводят к анизотропии материала. Из рисунка 3 видно, что, если материал в начальном состоянии был изотропным (равные модули упругости). С увеличением числа циклов модуль Юнга и сдвига в сечении, перпендикулярном оси образца изменяются сильнее, чем вдоль оси. Через измеряемые акустические характеристики можно определить механические характеристики.



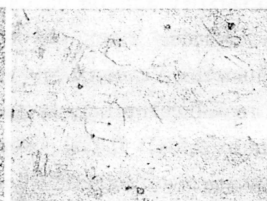
а)



б)



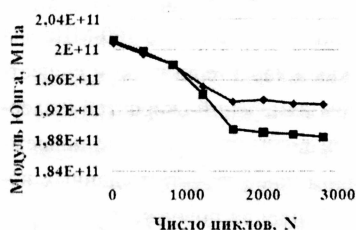
в)



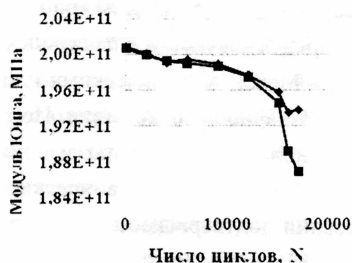
г)

Рис. 1. Трещина в образце 08Х18Н10Т, $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ циклов, $\times 135$

Рис. 2. Структура стали 08Х18Н10Т: а) поверхностные трещины, $\times 200$; б) структура на поверхности образца, $\times 200$; в) на глубине исходная, $\times 500$; г) после разрушения, $\times 500$; $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ циклов



$\varepsilon = 0,3\%$



$\varepsilon = 0,1\%$

Рис. 3. Зависимость модуля Юнга от числа циклов, сталь 08Х18Н10Т

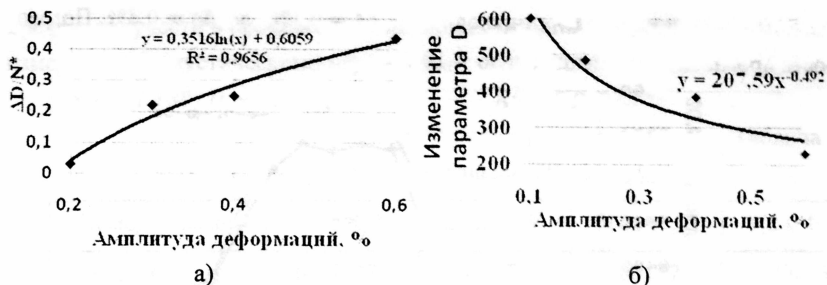


Рис. 4. Влияние амплитуды деформаций на: а) $\Delta D/N^*$
б) диагностический параметр D, сталь 08X18H10T

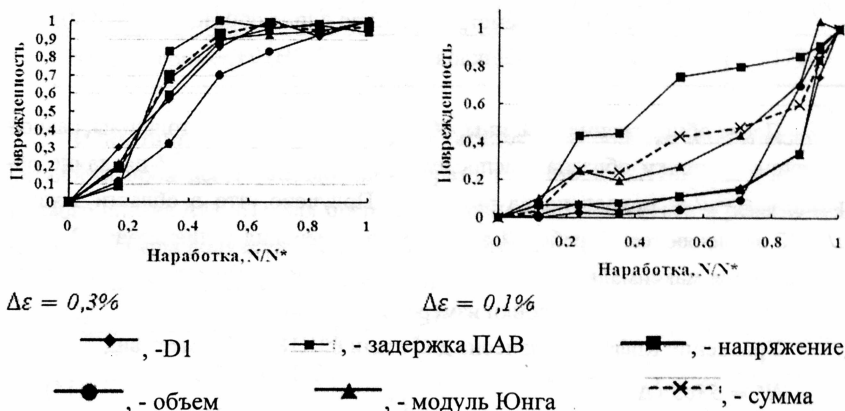


Рис. 5. Зависимость повреждаемости в образце от наработки, сталь 08X18H10T

Усредненное значение приращения диагностического параметра за один цикл нагружения ($\Delta D/N^*$) для различных амплитуд деформаций представлено на рис. 4.а. N^* соответствует критическому числу циклов при котором образуется трещина до 1 мм. С увеличением амплитуды пластических деформаций (изменение в диапазоне от $\Delta \varepsilon = 0,1\%$ до $\Delta \varepsilon = 0,6\%$) наблюдается уменьшение диапазона изменения диагностического параметра D (рис. 4.б). Следует отметить, что максимальное изменение параметра D имеет место для статического растяжения образцов до разрушения, изменение которого достигает $\Delta D_{\text{пластическое}} = 1100$. На рисунке 5 представлена зависимость изменения относительного значения измеряемых параметров, входящих в обобщенный критерий поврежденности (9) и модуля упругости, амплитуда напряже-

ний от приведенного числа циклов $N/N^* \Delta\epsilon = 0,1\%$ до $\Delta\epsilon = 0,3\%$. Погрешность прогноза не превышающую $\pm 10\%$.

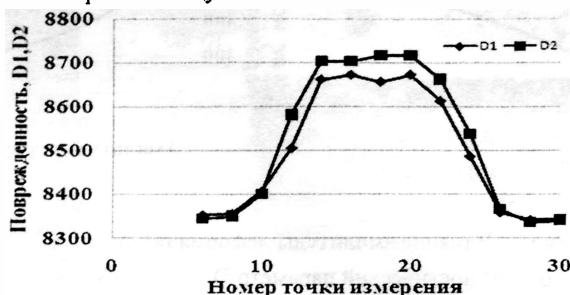


Рис. 6. Распределение параметра $D1, D2$ по длине образца, ($\Delta\epsilon = 0,3$), $N^* = 906$ циклов, сталь 08X18H10T

После обнаружения трещины, образец фрезеровали до толщины, равной толщине проточки образца. Распределение параметров $D1, D2$ по длине образца ($\Delta\epsilon = 0,3$) приведено на рисунке 6. Получено, что в области захвата $D1, D2$ не меняются. В рабочей зоне (точки измерения в диапазоне 12 – 25) наблюдается максимальное изменение $D1, D2$. Образец может использоваться в качестве эталона для настройки измерительной аппаратуры.

Уравнение Коффина-Мэнсона для стали 08X18H10T имеет вид:

$$N^* = 5365 (\Delta W_y)^{-1,913}, \quad (14)$$

где ΔW_y – работа напряжений за цикл (площадь петли гистерезиса), МДж/м³.

Наработка образца по результатам измерений текущей поврежденности (с использованием уравнения (14)) может быть определена:

$$N = 5365 (2,53 \cdot 10^{-5} \cdot D2 - 0,209)^{-1,913}, R^2 = 0,915. \quad (15)$$

В таблице 1 представлено критическое значение N^* , полученное в результате расчета по формуле (15) и сравнение его с экспериментальными данными и результатами расчетов по (14). Приводится значение N^* , полученное по результатам измерений поврежденности, использующей параметр $D2$. В таблице в скобках приводится отклонение от результатов испытаний образцов на малоциковую усталость (%). Как видим, точность определения критического числа циклов N^* с использованием акустического метода значительно выше. Обработка экспериментальных данных показала, что изменение

предела текучести в процессе малоцикловых испытаний однозначно связано с измеряемыми акустическими параметрами:

$$\sigma_{0.2} = 1,188 \cdot D - 10398, \quad R^2 = 0,9892. \quad (16)$$

Таблица 1.

Критическое значение N^*

Номер образца	1($\Delta\varepsilon=0,3$)	2($\Delta\varepsilon=0,3$)	3($\Delta\varepsilon=0,2$)	4($\Delta\varepsilon=0,1$)
Площадь петли	0,002771	0,002619	0,001377	0,000532
N^* , формула (14)	1510 (60%)	1555 (65%)	4038 (40%)	18336 (8%)
N^* , формула (15)	758 (16%)	849 (1%)	2909 (4%)	17943 (6%)
N^* , эксперимент	900	845	2800	17000

Испытания на многоцикловую усталость. В области многоциклового усталости проведены исследования образцов из стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМГ61. Для оценки остаточной долговечности в режиме мониторинга была получена эмпирическая формула:

- для алюминиевого сплава АМГ61

$$N_{ост} = 2,19 \cdot 10^{13} \sigma^{-3,784} \left[1 + \ln \frac{A}{A_0} \right], \quad (17)$$

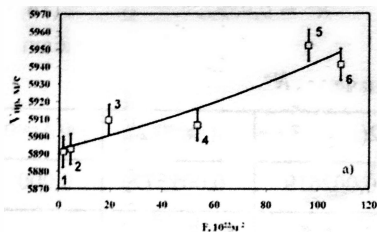
- для стали 12Х18Н10Т

$$N_{ост} = 1,6 \cdot 10^{24} \sigma^{-7,8} \left[1 + \ln \frac{A}{A_0} \right], \quad (18)$$

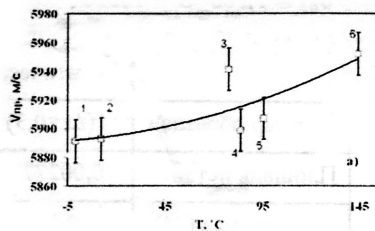
где A , A_0 – амплитуда поверхностной волны в момент измерения и начальное значение, соответственно.

Исследование влияния радиационного облучения на акустические характеристики материалов. Проведены исследования влияния радиационного облучения на механические свойства корпусной стали (15Х2МФА), сварных соединений и коррозионно-стойкой наплавки (08Х18Н10Т). Повреждающие дозы облучения, механические свойства и результаты акустических измерений (задержка поверхностной волны) для образцов приведены в таблице 2 (сталь 08Х18Н10Т). В таблице 2 приняты условные обозначения: ОМ – основной металл, МШ – металл шва. На рисунке 7, 8 приведены обобщенные результаты влияния флюенса на акустические характеристики и модули упругости (сталь 15Х2МФА). На рисунках 7 и 8 точки 1,2 соответствуют Хмель-

ницей АЭС (выгрузка 3), точка 3 - Кольской АЭС 1-й блок, точка 4 - 2-й блок, точка 5 - Нововоронежской АЭС 3-й блок, точка 6 - 4-й блок.



а)



б)

Рис. 7. Зависимость скорости продольной волны от

а) флюенса; б) критической температуры хрупкости. Сталь 15Х2МФА



а)



б)

Рис. 8. Влияние флюенса нейтронов на упругие характеристики, сталь 15Х2МФА а) модуль сдвига, б) модуль Юнга

Таблица 2.

Результаты измерений для образцов из стали 08Х18Н10Т

Повреждающая доза, сна	ОМ	МШ	ОМ	МШ	ОМ	МШ
	0		5-7		40	
$\sigma_{\theta 2}, \text{ МПа}$	295	460	890	970	1030	1025
$\sigma_B, \text{ МПа}$	570	615	955	1050	1110	1095
$t_R, \text{ нс}$	5273	5240	5341	5374	5387	5408

По результатам исследований была разработана методика измерений «физико-механических характеристик внутрикорпусных устройств реакторных установок типа ВВЭР спектрально-акустическим методом». Методика аттестована ФГУ «Нижегородский ЦСМ», в соответствии с ГОСТ Р 8.563-96, свидетельство № 649/1700 от 25.12 2009 г. Относительная погрешность (δ)

измерений физико-механических характеристик (ФМХ) (K - объемный модуль упругости, E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона) приводится в таблице 3.

Таблица 3.

Относительная погрешность измерений механических характеристик

ФМХ	K	E	ν	σ_{02}	σ_s
$\delta, \%$	10	10	10	15	15

Обоснование использования АЭ для контроля критических мест в конструкции. Проанализировано влияние различных режимов нагружения (скорость нагружения, величины приложенных напряжений и т.д.) на акустико-эмиссионные свойства сплава АМг61. На основании этих результатов обоснованы требования к системам поиска критических мест в крупногабаритных конструкциях. Показано, что снижение скорости деформирования образцов с $10 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ до $1 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ приводит к снижению интенсивности примерно в два раза. Снижение скорости деформирования до $0,1 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ приводит к уменьшению интенсивности почти на порядок. Для нагружения конструкции корпуса экраноплана из алюминиевых сплавов типа АМг 61 скорость роста напряжений должны поддерживаться постоянной, отклонения от заданной скорости не должны превышать $\pm 10\%$. Оптимальная скорость роста напряжений порядка $0,2 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты экспериментальных работ показали, что диагностический параметр, основанный на измерении скорости упругих волн, является характеристикой, чувствительной к степени деградации материала на ранних стадиях нагружения конструкции. Это позволяет использовать акустические методы в задачах оценки степени деградации материала и прогнозирования величины остаточного ресурса на ранних стадиях нагружения (статического, усталостного) в условиях радиационного, термического внешних воздействий.

В работе предлагается использование автоматизированных систем диагностирования, осуществляющих непрерывный мониторинг состояния материала. Для оценки ресурса, с учетом коэффициента безопасности, изменение поврежденности должно удовлетворять условию:

$$\Psi = \frac{\Psi_{\text{т.эк}} - \Psi_0}{\Psi^* - \Psi_0} \leq 0,8 \quad (19)$$

где: $\Psi_{\text{теп}}$, Ψ^* , Ψ_0 поврежденность материала, соответственно текущая, предельная, начальная.

В главе 5 «Диагностирование технического состояния промышленных объектов» изложены результаты практического применения.

1) Совместно с ОАО «Синтез» (г. Дзержинск, Нижегородской области) был исследован корпус разрушенной колонны (сталь 12Х18Н10Т).

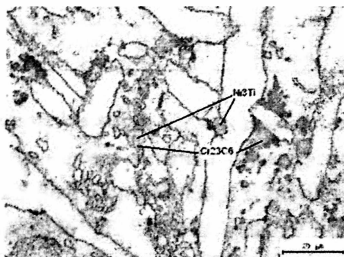


Рис. 9. Микроструктура внутренней поверхности колонны синтеза после 15 лет эксплуатации, сталь 12Х18Н10Т

Исследования разрушенной колонны показали, что произошло охрупчивание материала (рисунок 9), наблюдается анизотропия свойств, рост модулей упругости. Был сформулирован критерий предельного состояния K_δ :

$$K_\delta = \frac{E_\delta - E_0}{E_p - E_0}, \quad (20)$$

где - E_δ , E_0 , E_p - значение модуля Юнга, определяемого через скорости продольных и сдвиговых волн, в момент диагностики, в состоянии поставки и в момент хрупкого разрушения, соответственно.

При $K_\delta > 0,7$ металл находится в состоянии, близком к хрупкому разрушению и достигает предельного состояния.

2) На Нижегородском металлургическом заводе проведены исследования ножевой продукции (сталь 6ХС, 5ХНВС). После термической обработки имеет место коробление. При механической правке на гидравлическом прессе возможно разрушение. Предложен критерий качества гильотинных ножей:

$$\sigma_i + \sigma_p < \sigma_B \quad (21)$$

где: σ_i - значения остаточных напряжений в ноже, которые определяются при акустических измерениях, МПа,

σ_p - напряжения, создаваемые при правке на гидропрессе, МПа;

σ_B – предел прочности, МПа.

3) Проведены измерения остаточных напряжений на трубопроводах типа ДУ-300 (сталь 08Х18Н10Т, $\varnothing 325 \times 16$ мм) в районе сварных швов на атомных станциях: Калининская (блок 3), Смоленская и Курская (блок 3).

Измерения проводились в момент остановки энергоблоков. Предполагается, что на большом расстоянии от шва (более 200 мм) механические напряжения равны нулю. При проведении измерений была исключена зона термического влияния. Например, измерения показали, что максимальные значения кольцевых напряжений, измеренные на трубопроводах Калининской АЭС (блок 3) акустическим методом равны 250 ± 50 МПа. По расчетным данным максимальное кольцевое напряжение 300 МПа.

4) Проведены измерения на поясах ($\varnothing 33 \times 6$ мм, Ст15ХСНД), трубчатых раскосах ($\varnothing 133 \times 6$ мм, Ст15ХСНД), с предварительно напряженными тязами усиления из прутка ($\varnothing 22$ мм, сталь 09Г2С) ствола телебашни Санкт-Петербургского РТПЦ на отметке 164,0 м. Измерения показали, что на поясах значения напряжений -250 ± 50 МПа, в трубчатых раскосах -150 ± 30 МПа (5 точек по периметру), в тязях - 120 ± 30 МПа. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных, полученных акустическим методом, различаются на величину, не превосходящую 50 МПа, что подтверждает работоспособность предложенной методики.

Глава 6. «Обеспечение эксплуатации элементов конструкции корпуса экранопланов по техническому состоянию». Показано, что при контроле сложных конструкций корпуса экранопланов, спроектированных и построенных по проектам ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева необходимо первоначально получить информацию о критических зонах, используя все доступные методы: расчет, эксперимент. На следующем этапе ведется контроль за накоплением повреждений в металле критической зоны.

Для определения критических зон в конструкции предложено использовать метод АЭ. Конструкция корпуса экраноплана нагружается увеличивающейся ступенчатой нагрузкой (10% расчетной $P_{расч}$ на каждой ступени) с

последующей выдержкой на достигнутой ступени. Изменение АЭ при статическом нагружении экраноплана «Орленок» (носовое крыло, материал АМГ61) показано на рисунке 10. Для случая нагружения на этапе $0,9 P_{расч}$ на-

блюдается высокая активность АЭ: более $100 \text{ нмп} \cdot \text{с}^{-1}$. Осмотр конструкции

показал, что имеется остаточная пластическая деформация в кницах, произошел отрыв заклепочного соединения, длиной порядка 200 мм.

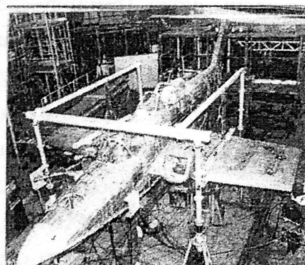
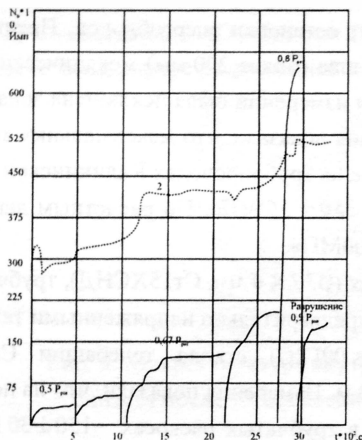


Рис. 10. Изменение АЭ при статическом нагружении экраноплана «Орленок» (носовое крыло, материал АМГ61)

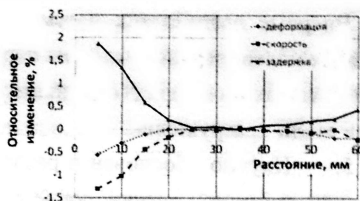
Рис. 11. Расположение экраноплана «Стриж» в испытательном стенде

В процессе резонансных испытаний на выносливость изделия «Стриж» (рис. 11) с помощью АЭ отработывалась методика обнаружения трещин и контроль за их развитием. Впервые в отечественной практике осуществлены резонансные испытания на выносливость легкого летательного аппарата. Появление устойчивых акустических сигналов совпадало с появлением трещины в конструкции.

Одним из конструктивных элементов экраноплана «Орленок» являются крюки замка грузового разъема (титановый сплав ВТЗ-1). Пластическая деформация и разрушение крюков не допускается. Крюки находятся в закрытом состоянии, затяжка составляет 6,5 тонн, расчетный ресурс с учетом коэффициентов безопасности 6,5 лет. На рисунке 12.а представлена схема измерений, на рисунке 12.б показаны результаты измерений в крюке находившемся под нагрузкой 300 кН в течение 24 часов.



а)



б)

Рис. 12. Крюк замка грузового разъема а) обозначения опасных сечений, б) распределение диагностического параметра в сечении «А-А»

В качестве диагностического параметра выбрано изменение задержки:

$$\delta\tau = \frac{(\Delta\tau^H - \Delta\tau^t) - (\Delta\tau_s^H - \Delta\tau_s^t)}{\Delta\tau_H} \cdot 100\%, \quad (22)$$

где:

$\Delta\tau^H$ - начальное значение задержки, мкс;

$\Delta\tau^t$ - задержка в момент измерения t , мкс;

$\Delta\tau_s^H$ задержка для эталонного образца в начальный момент, мкс;

$\Delta\tau_s^t$ — задержка для эталонного образца в момент измерения t ,

Обобщение экспериментальных данных позволило выбрать в качестве критического значения $\delta\tau = 0,4\%$. Периодичность контроля - два раза в год.

Основные результаты и выводы по работе

1. Развит акустический метод, показана возможность его применения в качестве метода неразрушающего контроля технического и структурного состояния натуральных объектов с учетом стадийности и локализации процессов деформации и разрушения.

2. Установлено, что структурные изменения при низкотемпературном радиационном охрупчивании приводят к росту скорости упругих волн.

3. Показано, что при малоцикловой усталости в условиях жесткого цикла нагружения в аустенитной стали на стадии накопления повреждений скорость упругих волн уменьшается по сравнению с исходным состоянием. С уменьшением амплитуды пластических деформаций цикла диапазон изменения скорости увеличивается. Максимальное изменение наблюдается при статическом растяжении образцов.

4. Показано, что при усталостном нагружении процессы, связанные с накоплением повреждений, протекают более ускоренно в поверхностном

слое. Впервые разработана математическая модель, учитывающая влияние состояния поверхностного слоя на параметры поверхностных волн, использование которых позволяет оценивать состояние материала конструкции на ранней стадии разрушения.

5. Научно обоснован и разработан комплексный интегральный акустический критерий оценки поврежденности (предельного состояния) длительно работающего металла.

6. Предложены и сертифицированы методики для определения механических характеристик материала на элементах конструкций без ее разрушения.

7. Разработано программное обеспечение и разработана модификация прибора, позволяющая производить оценку физико-механических характеристик, поврежденность материала и напряженно-деформированного состояния непосредственно на конструкции.

8. Экспериментально полученные и систематизированные данные позволили уточнить влияние углерода, режимов термической обработки на свойства углеродистых сталей и скорость упругих волн. Показано, что для равновесного состояния сталей (отжиг) скорость упругих волн максимальна, после закалки наблюдаем минимальную скорость. Предложена методика измерения остаточных напряжений. Результаты акустических исследований подтверждаются данными рентгеноструктурного анализа.

9. Показано, что метод АЭ является эффективным и информативным методом идентификации процессов пластической деформации и трещинообразования в материале при его нагружении. При этом установлено, что суммарное количество актов АЭ зависит от напряженно-деформированного состояния и скорости его изменения. Предложен и впервые успешно использован метод определения критических зон в сложных конструкциях «экраноплана» при статическом и циклическом нагружении.

10. Результаты диссертационной работы служат основой практического применения методов неразрушающего контроля в задачах диагностики материалов и конструкций на любом доступном для контроля участке без разрушения и изготовления специальных образцов.

11. Предложена методика и вариант системы диагностирования сложных технических объектов. Предлагаемая методика позволяет адекватно прогнозировать как место разрушения, так и наработку материала конструкций в режиме мониторинга.

Список работ по теме диссертации:

1. А.с. 1322798 СССР, G 01 № 23/20. Способ определения долговечности образцов и элементов конструкций / И.Е. Куров, Л.Ф. Циферблат, А.А. Хлыбов, М.И. Гуревич, С.В. Перельман, Б.С. Перельман (СССР) // Бюллетень изобретений. – 1987. № 25.
2. А.с. 1582119 СССР, G 01 № 29/04. Ультразвуковой способ определения остаточной долговечности элементов конструкций / Б.С. Перельман, В.И. Унылов, А.А. Хлыбов, И.Е. Куров, М.И. Гуревич, С.В. Перельман (СССР) // Бюллетень изобретений. – 1990. № 28.
3. Акустический метод определения осевых напряжений для произвольного участка трубопровода / Н.П. Алешин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2008. - № 3. - С. 14-19.
4. Васильев В.Г., Углов А.Л., Хлыбов А.А. Акустический метод контроля состояния корпусов ВВЭР // Атомная энергия. - 2009.- Т. 106, вып. 1. - С. 31-35.
5. Хлыбов А.А., Васильев В.Г., Углов А.Л. Определение физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2007.- Т. 73.- № 12.- С. 46-49.
6. Васильев В.Г., Углов А.Л., Хлыбов А.А. Исследование влияния радиационного облучения на акустические характеристики материала корпуса реактора // Контроль. Диагностика. - 2007. - №12.- С. 30-34.
7. Об особенностях использования акустического метода контроля напряженного состояния трубопроводов из сталей с регулируемой прокаткой / Н.П. Алешин [и др.] // Контроль. Диагностика. -2008. -№ 1. -С. 28 - 30.
8. Пат. №2365911 Российская Федерация, МПК G01N 29/22. Ультразвуковой датчик сдвиговых волн / М.А. Прилуцкий, А.Л. Углов, А.А. Хлыбов; Заявка №2007126281/28 10.07.2007; опубл. 27.08.09. Бюл.№24.- 4с.: ил.
9. Скуднов В.А., Хлыбов А.А., Чегуров М.К. Поведение структуры и повреждаемость толстолистовой стали 12Х18Н10Т в конструкции колонн при производстве пентакарбонила железа // Контроль. Диагностика. - 2007. - № 12. - С. 49-54.
10. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Пичков С.Н. Оценка качества внутренней резьбы баллонов спектрально-акустическим методом // Контроль. Диагностика. - 2010. - № 5. - С. 40-44.

11. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Оценка остаточных напряжений в трубопроводах из стали 08Х18Н10Т // Контроль. Диагностика. - 2009. - № 6. - С. 32-35.
12. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Спектрально акустический метод контроля характеристик конструкционных материалов и аппаратно-программные средства его реализации // Вопросы радиоэлектроники. Радиолокационная техника. - 2008. - Вып. 3. - С. 174-180.
13. Углов А.Л., Хлыбов А.А. Спектрально-акустическая система «АСТРОН». Опыт практического использования в задачах контроля состояния потенциально опасных технических объектов // Экология и охрана труда. - 2006. - № 1. - С. 28-33.
14. Углов А.Л., Хлыбов А.А. Особенности конструкции ультразвукового датчика для контроля неоднородного распределения напряжений в плоских элементах конструкций // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2007. - № 10. - С. 38-41.
15. Хлыбов А.А. Акустический метод оценки технического состояния крюков из сплава ВТЗ-1 // Деформация и разрушение материалов. - 2008. - № 8. - С. 31-36.
16. Хлыбов А.А., Колыванов В.В. Методика оценки технического состояния гребных валов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология. - 2010. - № 1. - С. 169-171.
17. Хлыбов А.А., Колыванов В.В. Экспериментальные исследования разрушения гребных валов судов типа «Речной» // Контроль. Диагностика. - 2010. - №4. - С. 43-48.
18. Хлыбов А.А. Оценка напряженного состояния гильотинных ножей, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2009. - Т. 75, № 4. - С. 54-57.
19. Хлыбов А.А., Ошурина Л.А. Сравнительный анализ определения величины остаточных напряжений в стали 6ХС акустическим и рентгеновским способами // Приволжский научный журнал. - 2010. - № 2. - С. 16-21.
20. Хлыбов А.А., Пичков С.Н., Углов А.Л. Исследование накопления рассеянных микрповреждений в образцах из стали 08Х18Н10Т при малоциклового усталости // Контроль. Диагностика. - 2011. - № 4. - С. 55-61.

21. Хлыбов А.А. Использование метода акустической эмиссии для оценки состояния судовых конструкций // Труды НГТУ. Современные проблемы прикладной механики. - Н. Новгород, 2005.- Т. 43.- С. 137-145.
22. Исследование стали 30ХГСА после скоростного электроимпульсного нагрева при термической обработке / И.М.Мальцев [и др.] // Труды НГТУ. Материаловедение и металлургия (Н. Новгород).- 2007.-Т. 61.- С. 80-90.
23. Хлыбов А.А. Использование поверхностных волн в задачах контроля накопления усталостных микрповреждений // Тез. докл. IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. - Н.Новгород, 2006.- Т. 3.- С. 212-213.
24. Хлыбов А.А. Исследование влияния радиационного облучения на акустические характеристики материала корпуса реактора // Фундаментальные проблемы машиноведения: новые технологии и материалы: Тез. докл. 2-й Всероссийской научн. конф. - Н.Новгород, 2007. - С. 102.
25. Хлыбов А.А. Исследование влияния состояния материала корпусов реакторов ВВЭР на параметры упругих волн // Труды НГТУ. Материаловедение и металлургия (Н. Новгород).- 2007.-Т. 61.- С. 105-109.
26. Хлыбов А.А. Исследование влияния термической обработки на параметры упругих волн в стали 6ХС // Фундаментальные проблемы машиноведения: новые технологии и материалы: Тез. докл. Всероссийской науч.-технич. конф. - Н.Новгород, 2006. - С. 78-81.
27. Хлыбов А.А. Исследование возможности применения упругих волн в задачах оценки качества изделий ножевой продукции // Труды НГТУ. Материаловедение и металлургия (Н.Новгород).-2008.-Т. 68.-С.137-141.
28. Использование упругих волн в задачах оценки технического состояния конструкций, эксплуатируемых в области малоциклового усталости / Ф.М. Митенков [и др.] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. докл. 8 междунар. конф. - М., 2009.- С. 24-26.
29. Углов А.Л., Хлыбов А.А. Исследование влияния радиационного облучения на параметры упругих волн // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. докл. 7-й международной конференции. - М., 2008.- С. 177-179.
30. Хлыбов А.А. Контроль накопления повреждений при малоциклового усталости // Заготовительные производства и материаловедение: Тез.

докл. межрег. науч.- практич. конф., посвященной 100-летию проф. А.А. Рыжикова.- Н.Новгород, 2009. - С. 80-83.

31. Углов А.Л., Хлыбов А.А. Спектрально-акустический метод контроля физико-механических характеристик конструкционных материалов и аппаратно-программные средства его реализации (ИВК «Астрон») // Тез. докл. 2-й Всероссийской научной конференции по волновой динамике машин и конструкций. - Н.Новгород, 2007. - С. 96-97.

32. Хлыбов А.А. Обеспечение эксплуатации крупногабаритных конструкций по техническому состоянию: Монография. - Н.Новгород: НГПУ, 2008. - 136 с.

33. Хлыбов А.А. Обоснование применения поверхностных волн Рэлея в задачах диагностики неоднородной среды // Первая Всероссийская конференция Проблемы механики и акустики сред с микро и наноструктурой: НАНОМEX-2009.- Н.Новгород, 2009.- С. 145-146.

34. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Определение физико-механических характеристик и остаточных напряжений в сварных соединениях с использованием упругих волн // Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве: Материалы Всероссийской науч.-технич. конф., посвященной памяти выдающихся выпускников НГТУ.- Н.Новгород, 2006.- С. 303-308.

35. Хлыбов А.А. Оценка структурных изменений в конструкционных металлических материалах в задачах обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов. - Н.Новгород: НГПУ, 2010. - 153 с.

36. Хлыбов А.А., Скуднов В.А. Оценка структурных изменений в конструкционных металлических материалах акустическими методами для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов // Труды НГТУ. (Н.Новгород). - 2010. - №1. - С. 200-209.

37. Vasil'ev V.G., Uglov A.L., Khlybov A.A. Acoustic method for monitoring the state of VVER vessels// Atomic Energy.- 2009.-V.106.- №1.- P. 37-42.

38. Khlybov A.A., Skudnov V.A., Chegurov M.K.. Behavior of structure and damaging of thick plate steel 12H18N10T in column construction in production of iron pent-carbonyl// Testing. Diagnostics.-2010.- Issue 01.- P. 29-32.