

На правах рукописи



Фольмер Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА**

Специальность 05.03.06 «Технологии и машины сварочного производства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (ГОУ ВПО КузГТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Смирнов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Штенников Василий Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент
Тимошенко Владимир Петрович

Ведущее предприятие ГОУ ВПО
«Томский политехнический университет»
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНТРОСКОПИИ (НИИ ИН)

Защита состоится «26» ноября 2009 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) по адресу: 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46; факс (3852) 36-79-03; e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.О. Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение требований промышленной безопасности к основным материалам и сварным соединениям постоянно стимулирует разработки в области технологии изготовления, контроля качества, эксплуатации, оценки ресурса при проведении ремонтно-восстановительных работ трубопроводов технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО). Для обеспечения их безопасной работы необходимо максимально точно определять структурные изменения, протекающие в сварных соединениях. Это приводит к необходимости поиска новых и усовершенствования существующих методов исследования и контроля качества сварных соединений трубопроводов.

Современные методы и средства неразрушающего контроля нацелены, главным образом, на выявление уже существующих макродефектов.

Применяемые методы неразрушающего контроля (магнитные, вихретоковые, рентгеновские и т.д.), не позволяют, в необходимой мере, определять характер изменения структурно-фазового состояния сварных соединений в процессе эксплуатации.

Перспективными в этом плане являются акустические методы. Одним из важнейших достоинств акустических методов является возможность контролировать поверхностные несовершенства в материалах с применением *волн Рэлея (поверхностных акустических волн – ПАВ)*. Известно, что в сварных соединениях ТУОПО накопление микроповрежденности, образование микро- и макротрещин происходит, преимущественно, в поверхностных слоях и применение ПАВ позволят исследовать поверхностные микроструктурные несовершенства в сварных соединениях.

Несмотря на ряд неоспоримых преимуществ, применение ПАВ для оценки ресурса тормозится недостаточным количеством достоверных научных исследований о связи акустических характеристик со структурно-фазовым состоянием металла сварных соединений трубопроводов на различных этапах их жизненного цикла.

Изложенное свидетельствует об актуальности диссертационной работы.

Исследования выполнялись в рамках гранта Министерства образования РФ: «Диагностирование наноструктурированного состояния основного металла и сварных соединений технических устройств опасных производственных объектов для предотвращения техногенных катастроф» (шифр 2009-1.1-223-009-043) и программы Министерства образования РФ: «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы научно-исследовательские работы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф» шифр «2009-1.1-223-009».

Цель работы – повышение эффективности оценки ресурса сварных соединений трубопроводов путем установления закономерностей изменения акустических характеристик при эволюции структурно-фазового состояния углеродистых и теплоустойчивых сталей.

Основная идея работы заключается в использовании установленных связей между структурно-фазовым состоянием, внутренними напряжениями и характеристиками распространения акустических волн для повышения надежности сварных соединений ТУОПО.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определить состояние и методы оценки ресурса сварных соединений трубопроводов ТУОПО;
2. Разработать функциональную модель управления безопасной эксплуатации сварных соединений ТУОПО на основе применения современного спектрально-акустического метода;
3. Разработать методическое обеспечение и провести экспериментальные исследования сварных соединений трубопроводов;
4. Исследовать влияние дальнodelствующих полей внутренних напряжений на величину времени задержки ПАВ в сварных соединениях, на различных этапах их жизненного цикла;
5. Разработать комплексный критерий и методические рекомендации по оценке ресурса сварных соединений ТУОПО, провести их апробацию и внедрение в промышленность.

Методы решения поставленных задач включают: анализ литературных источников; лабораторные исследования; натурные испытания с обработкой результатов методами математической статистики; научное обобщение полученных результатов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана функциональная модель управления безопасной эксплуатации сварных соединений ТУОПО, представленная в виде информационной системы знаний и закономерностей, позволяющая направленно определять надежность сварных соединений на основании проведения мероприятий по оценке ресурса, учитывающая комплекс физико-механических и акустических свойств;
2. Впервые установлены зависимости между дальнodelствующими полями внутренних напряжений, амплитудой кривизны-кручения кристаллической решетки и акустическими характеристиками исследованных длительно работающих сварных соединений;
3. Установлено влияние источников внутренних полей напряжений на время задержки ПАВ, показано, что увеличение плотности изгибных экстинкционных контуров приводит к росту времени задержки ПАВ.

Практическая ценность результатов работы:

1. Разработана комплексная программа исследования состояния поверхностного слоя сварных соединений трубопроводов, в основу которой положен спектрально-акустический метод и электронная микроскопия;

2. Разработан комплексный критерий оценки ресурса сварных соединений трубопроводов;
3. Разработаны методические рекомендации по оценке ресурса длительно работающих сварных соединений объектов котлонадзора. Предложенные разработки нашли применение на промышленных предприятиях Кузбасса: ОАО «Кузбассэнерго» Кузбасский филиал Томь-Усинская ГРЭС, КОАО «АЗОТ», ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь», ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

Достоверность результатов исследований

Решение основных задач базируется на результатах теоретических и лабораторных исследованиях; представленным объемом экспериментальных данных; использованием современного исследовательского оборудования. Большинство полученных результатов согласуются с общими представлениями теории ПАВ и результатами исследований других ученых и специалистов.

Реализация результатов работы.

Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде методических рекомендаций с суммарным годовым экономическим эффектом 320000 рублей в условиях ОАО «Кузбассэнерго» Кузбасский филиал Томь-Усинская ГРЭС, ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

Результаты исследований включены в рабочие программы учебных курсов «Методы контроля сварных соединений», «Проектирование сварных конструкций» для студентов специальности 120500 «Оборудование и технология сварочного производства».

Личный вклад автора заключается:

1. В разработке функциональной модели управления безопасной эксплуатации сварных соединений ТУОПО и применении ее в проведении работ по оценке ресурса сварных соединений трубопроводов;
2. В определении физических закономерностей изменения величины локальных полей внутренних напряжений и времени задержки ПАВ;
3. В разработке комплексного критерия и методических рекомендаций по оценке ресурса сварных соединений спектрально-акустическим методом.

Апробация работы

Основные научные положения докладывались на Российских и международных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства», Тольятти, 2006 г.; IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», Томск, 2008 г.; VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2008 г.; Региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию общеобразовательного факультета ТГАСУ «Перспективные материалы и технологии», Томск, 2009 г.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных трудах (из которых 4 – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из четырех глав, основных выводов и методических рекомендаций, списка использованной литературы из 137 наименований и 2 приложений. Работа содержит 207 страниц, в том числе 153 страницы основного текста, 76 рисунков, 13 таблиц и приложения на 39 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко определен объект исследований, изложены суть поставленной цели и задач исследования. Кратко представлены методы исследований, и оборудование, обеспечивающее достоверность исследований, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе подробно изложены условия работы и проанализированы основные виды эксплуатационных повреждений сварных соединений ТУОПО.

Показана значительная роль разрушающих и неразрушающих методов оценки ресурса сварных соединений для обеспечения безопасной эксплуатации ТУОПО. Проанализированы технические возможности существующих методов неразрушающего контроля и выявлено, что одним из наиболее перспективных является акустический спектрально-акустический метод.

Одним из важнейших достоинств акустических методов является возможность контролировать поверхностные несовершенства в материалах с применением ПАВ. Известно, что накопление микроповрежденности, образование эксплуатационных микро – и макродефектов происходит, преимущественно, в поверхностных слоях и применение ПАВ может привести к их выявлению и оценке ресурса сварных соединений.

Вопросам оценки структурно-фазового состояния и ресурса сварных соединений, а также возможности применения акустических методов посвящены работы целого поколения ученых: Алешина Н.П., Анохова А. Е., Бернштейна М. Л., Бениевой Т.Я., Бобренко В.М., Ботвиной Л.Р., Ганиева В.В., Гузь А.Н., Зуева Л.Б., Земзина В. Н., Иванова Ю.Ф., Ключева В.В., Козлова Э.В., Коневой Н.А., Кормана А. И., Комарова К.Л., Красавина В.В., Левитана Л. Я., Лифшица Л. С., Мазель Р. Е., Митенкова Ф. М., Муравьева В.В., Новиковой Д. П., Никитиной К.Е., Попцова В. М., Поповой Н.А., Смирнова А.Н., Углова А. Л., Хромченко Ф. А., Шарко А.В., Шрона Р.З. и др.

Анализ работ выявил различия во взглядах разных исследователей на методы оценки ресурса сварных соединений и позволил сформулировать цель и задачи работы.

Таким образом, анализ существующих работ в области оценки ресурса сварных соединений показал, что необходимо проведение комплекса мероприятий по обобщению и систематизации существующих методов контроля качества сварных соединений с последующим применением спектрально-акустического метода, проведения аналитических и экспериментальных исследований взаимо-

связей параметров микроструктуры и акустических характеристик.

Во второй главе разработана функциональная модель управления безопасной эксплуатации сварных соединений ТУОПО и методика экспериментальных исследований с применением спектрально-акустического метода для оценки ресурса сварных соединений.

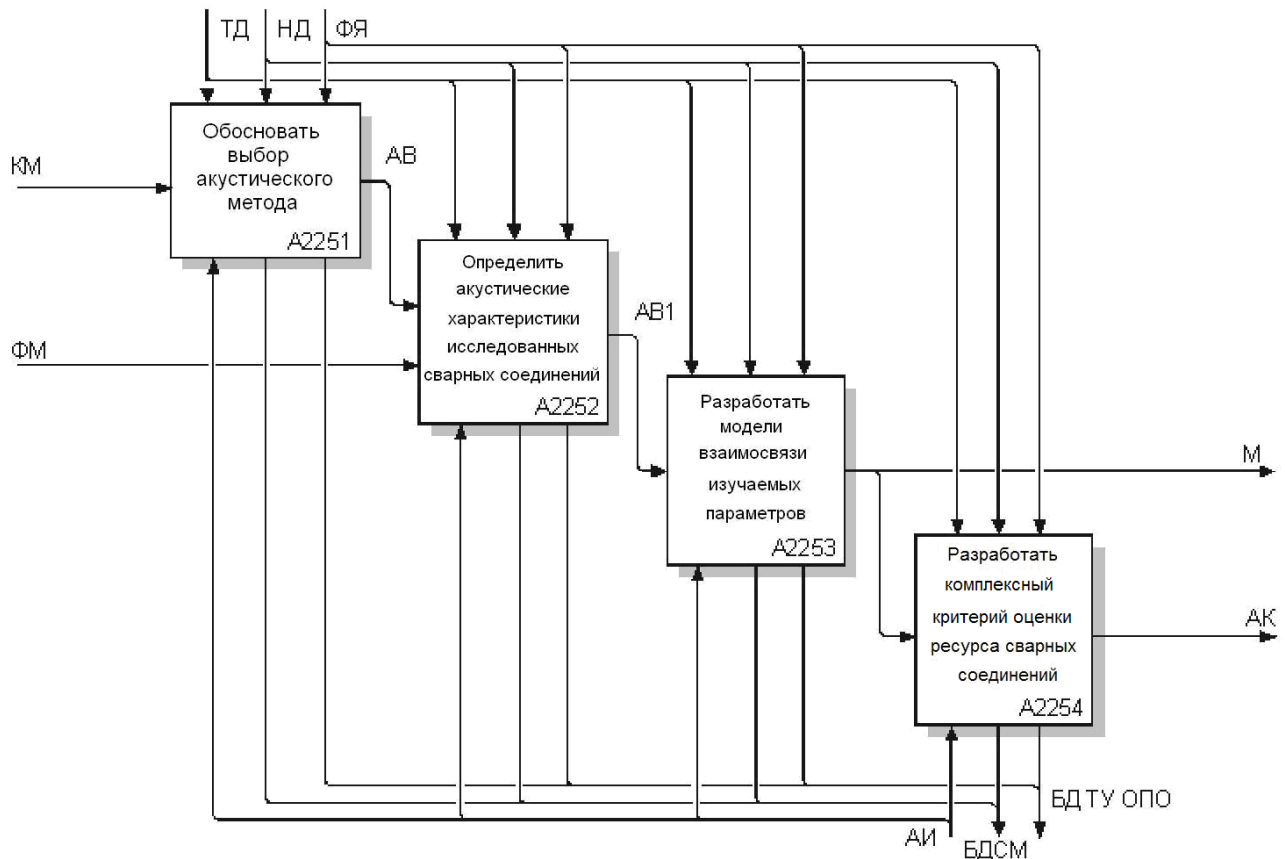
Функциональная модель представлена в виде информационной системы знаний и закономерностей, позволяющая направленно определять ресурс сварных соединений на основании проведения мероприятий, учитывающих комплекс физико-механических, акустических свойств и условий эксплуатации.

В разработке функциональной модели использованы системный и объектно-ориентированный подходы к описанию проблемы, когда микроструктурное состояние сварных изделий представляется в виде информационной системы знаний и закономерностей в соответствии с методологией структурного моделирования.

Проведена декомпозиция модели (рис.1) до уровня стадий и этапов выполнения экспертизы и разработки акустического метода оценки ресурса сварных соединений трубопроводов. В данной структурной модели выполненный комплекс существующих неразрушающих методов исследования (КМ) представляет собой исходные данные для определения состояния металла сварных соединений по акустическим характеристикам. Обоснованный выбор способа с последующими акустическими измерениями (АВ - время задержки ПАВ), результаты физико-механических характеристик исследованных сварных соединений (ФМ) после различных сроков эксплуатации и их взаимосвязи с физико-механическими характеристиками предаются по (АВ1) в блок (А2253), где методами математического моделирования разрабатывают модели взаимодействия изучаемых параметров. Математические модели через (М) связаны с блоком (А2254) для разработки комплексного критерия оценки ресурса длительно работающих сварных соединений (АК). Механизмом реализации является процесс акустических измерений (АИ) под управляющим воздействием физико-химических явлений (ФЯ), которые произошли в исследованном сварном соединении за определенный период наработки, а также нормативной и технической документация (НД, ТД). Запросы в базы данных ТУ ОПО и состояния сварных соединений (БДСМ) дают экспертам информацию о процессах, протекающих в сварных соединениях аналогичных технических устройств при близких сроках и условиях эксплуатации.

В работе показано, что существуют связи между различными блоками разработанной модели, которые требуют специальных исследований. В работе проведено детальное исследование этих связей. Таким образом, функциональная модель управления безопасной эксплуатации ТУОПО дает четкое представление о существующем и разработанном в настоящей работе подходе к оценке ресурса сварных соединений.

Некоторые из этих связей уже исследованы. Для подтверждения гипотезы о закономерностях изменения акустических характеристик в зависимости от структурно-фазового состояния (полей внутренних напряжений и т.д.) длительно работающих сварных соединений требует проведения широкого круга исследований.



АВ - выбранные способы акустических измерений

АВ1 - результаты акустических измерений исследованных сталей в различном структурном состоянии и после различных сроков эксплуатации и их взаимосвязи с физико-механическими характеристиками

Рис. 1. Декомпозиция функциональной модели определения состояния сварных соединений по акустическим характеристикам (декомпозиция блока A225)

В качестве основных материалов для выполнения экспериментальных исследований были выбраны 62 сварных соединения паропроводов (сталь 12Х1МФ, 20), газопроводов (сталь 20) и металлических конструкций для котельного оборудования (сталь 09Г2С).

Цель экспериментальных исследований заключалась в проверке корректности функциональной модели и выявлении общих закономерностей изменения величины времени задержки ПАВ в зависимости от эволюции микроструктуры сварных соединений на разных стадиях их «жизненного цикла».

Технологические и эксплуатационные характеристики сварных соединений определяются особенностями их микроструктуры, поэтому исследование тонкой структуры стали является весьма важной задачей. Основными методами исследования, используемые в практике являлись оптическая микроскопия при увеличениях до 500 крат и, значительно реже рентгеноструктурный анализ.

В данной работе впервые были использованы и проанализированы результаты следующих методов исследования: 1) просвечивающая дифракционная электронная микроскопия на тонких фольгах (ПЭМ); 2) растровая электронная микро-

скопия (РЭМ); 3) рентгеноструктурный анализ (РСА); 4) спектрально-акустический метод.

В экспериментах была использована следующая аппаратура: для метода ПЭМ – электронный микроскоп ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ и рабочем увеличении в колонне микроскопа 25000 крат; для метода РЭМ – электронный микроскоп Tesla BS-301 при рабочих увеличениях 200-2000 крат и для метода РСА – рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 с использованием $\text{Cu-K}\alpha$ рентгеновского излучения высокой интенсивности. Регистрация отражений осуществлялась с помощью пропорционального счетчика с записью на диаграммную ленту. Для спектрально – акустического метода – многофункциональная установка «АСТРОН» предназначенная для оценки физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических устройств.

В качестве датчика многофункциональной системы «АСТРОН» использовался оригинальный малобазовый релеевский преобразователь для оценки скорости распространения импульсов ПАВ с центральной частотой 5МГц, коррелирующей со степенью повреждаемости поверхностного слоя металла сварного соединения.

Измерение скорости и времени задержки ПАВ проводили на тех же участках на которых в дальнейшем выполняли электронно-микроскопические исследования (материал основного металла вдали от сварного шва; зона термического влияния; наплавленный металл шва).

Средние размеры зерен, карбидных прослоек и отдельно отстоящих друг от друга частиц и их плотности распределения определялись по фотографиям, полученным методами РЭМ и ПЭМ. Скалярная плотность дислокаций измерялись по соответствующим микрофотографиям по стандартным методикам. Полученные данные обрабатывались статистически. Фазовый анализ проводился двумя методами: 1) методом РСА и 2) методом ПЭМ из расшифровки соответствующих микроэлектрограмм, из наблюдений в светлых и темных полях.

По совокупности всех примененных методов исследования определялись следующие параметры: размер зерна, тип и количество фаз, параметры кристаллической решетки, скалярная и избыточная плотность дислокаций, внутренние напряжения. Последние определялись несколькими методами: локальные – методом ПЭМ, интегральные – методом РСА.

Для проведения акустических измерений поверхность сканирования была разбита на зоны в виде прямоугольников, после чего регистрировались акустические характеристики с установкой датчика как вдоль образца на поверхности сварного соединения (не менее 12 раз) так и поперек образца на поверхности сварного соединения (не менее 12 раз), с последующим статистическим анализом полученных данных при помощи пакета программ «Statistica».

Механические характеристики исследованных сварных соединений проводили по ГОСТ 6996-66.

В третьей главе приведено детальное описание структуры, фазового состава и внутренних напряжений в сварных соединениях из стали 20 и 12Х1МФ трубопроводов потенциально опасного оборудования.

В ходе исследования с применением электронной микроскопии установлено, что независимо от места исследования основной фазовой составляющей (матрицей) стали 12Х1МФ является α -фаза.

Выявлено, что независимо от места исследования на образце α -фаза всегда составляет основную часть материала. Морфологически α -фаза в различных образцах в общем случае присутствует в виде: 1) ферритных зерен (наименее дефектная часть материала (рис.2); 2) фрагментированного феррита; 3) дефектного феррита (участки материала с высокой плотностью дислокаций и большой кривизны-кручения кристаллической решетки) и 4) участков материала, содержащих микротрещины.

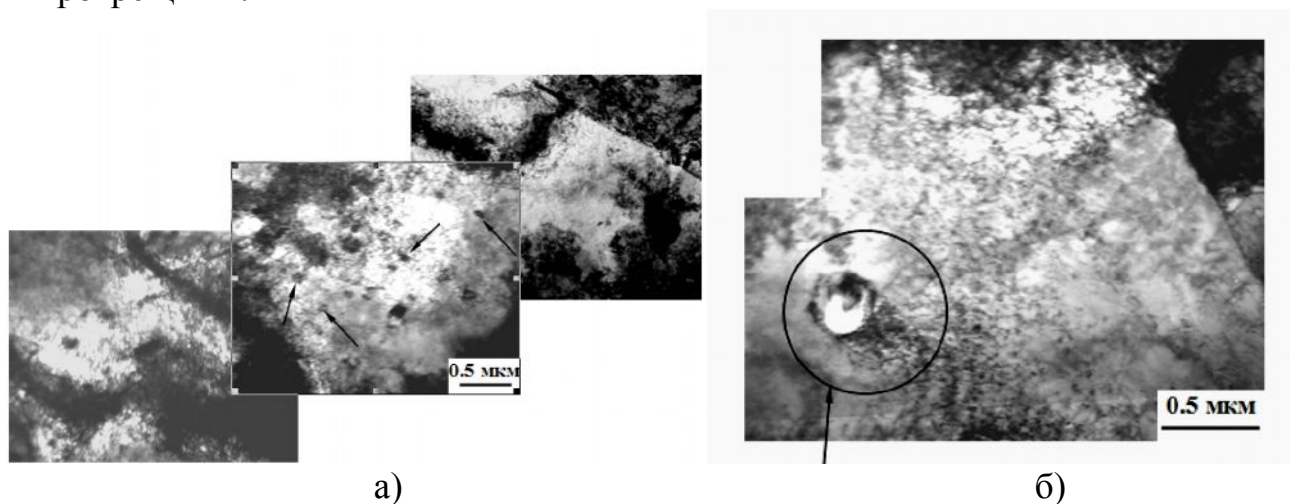


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 12Х1МФ. *а* – ферритное зерно, присутствуют частицы карбида $M_{23}C_6$, не связанные с дислокациями (основной металл); *б* – ферритное зерно, присутствует частица карбида $M_{23}C_6$ (металл шва).

Определена амплитуда локальных напряжений (τ), рассчитанная по величине амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки (χ), при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения образца изменяется таким же образом, как и (χ) (рис.3). Причем, необходимо отметить, что пластическая составляющая (рис.3, кривая 1) во всех точках образца одинакова и величина напряжений (рис.3, кривая 3) определяется величиной её упругой составляющей (рис.3, кривая 2) своим максимумом показывает пик внутренних напряжений, т.е. величину активной составляющей структуры материала, способствующей развитию микротрещин.

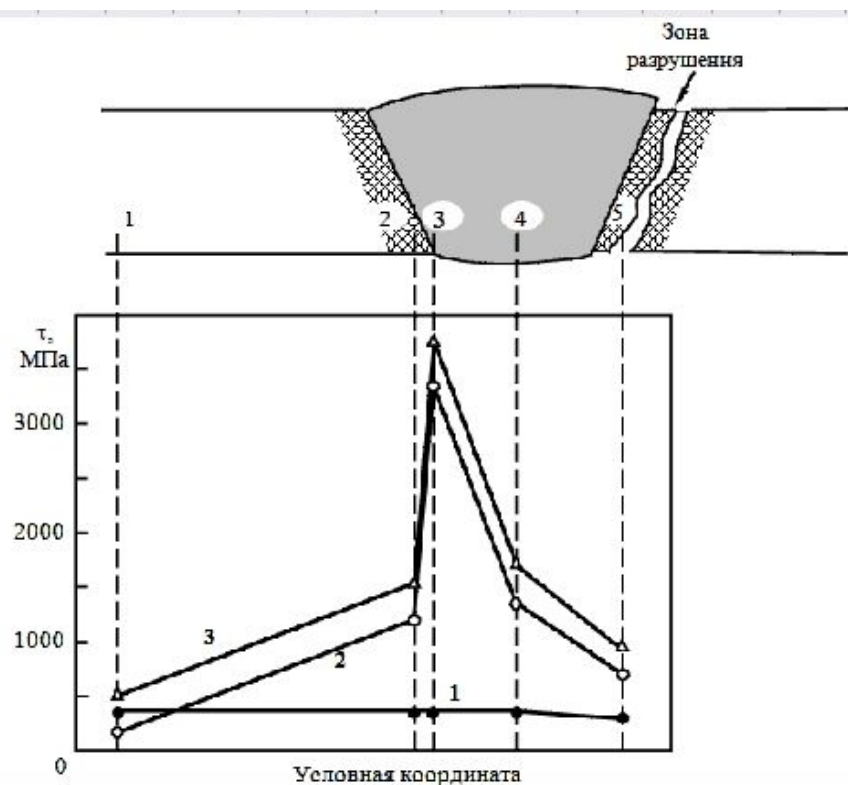


Рис. 3. Изменение средней по материалу амплитуды локальных напряжений (τ) при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения:

1 – пластическая составляющая, 2 – упругая, 3 – суммарные напряжения.

Выявлено, что объемная доля материала, содержащего участки дефектной α -фазы и микротрещины, растет с увеличением средних внутренних напряжений (рис. 4, а). Средние внутренние напряжения носят критический характер, поскольку приближаются к средним напряжениям, разрушающим исследуемую сталь.

Высокая пластичность исследуемой стали приводит к тому, что вначале формируется фрагментированная дислокационная структура, зарождаются микротрещины, а затем путем слияния трещин идет процесс разрушения. Надо констатировать, что большой запас пластичности позволяет стали функционировать. Тем не менее, после длительной эксплуатации локальные напряжения более чем в 8-12 раз превосходят временное сопротивление разрыву σ_B и поэтому сталь работает в опасных условиях. Помимо всего сказанного выше, важное значение имеет линейная зависимость $P_V = f(<\tau>)$ представленная на рис.4. Это означает, что эти параметры тесно связаны между собой.

При исследовании сварного соединения (сталь 20) установлено, что оно в основном состоит из α -фазы и морфологически α -фаза подразделяется на а) α -феррит и б) α -фазу, находящуюся в перлитной составляющей.

Объемные доли структурных составляющих матрицы стали (феррита и перлита) определялись с помощью всех трех методов исследования, а объемные доли α -фазы и цементита – методами ПЭМ и РСА. Как было установлено, основную часть структуры стали составляет α -фаза, её объемная доля ($\sim 0,94-0,96$). Остальную часть материала ($\sim 0,04-0,06$) составляет легированный цементит.

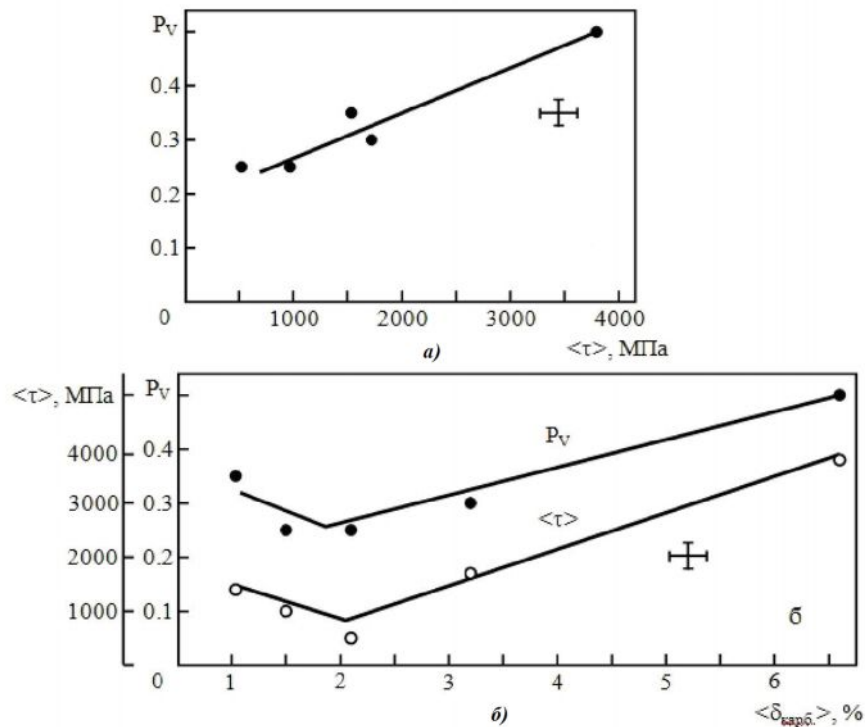


Рис. 4. Связь средних количественных параметров структуры между собой: *а* – объемной доли структуры, содержащей дефектную α -фазу и микротрещины, (P_V) с внутренними полями напряжений ($\langle \tau \rangle$); *б* – объемной доли структуры, содержащей дефектную α -фазу и микротрещины, (P_V) и внутренних полей напряжений ($\langle \tau \rangle$) с объемной долей карбидной фазы ($\langle \delta_{carb} \rangle$)

В результате исследования амплитуда локальных напряжений - $\sigma_{лок}$ (или моментных напряжений) в феррите достигает 330 МПа. Эта величина выше предела текучести, поэтому не удивительно, что в феррите исследуемой стали наблюдается высокое значение средней скалярной плотности дислокаций. Одновременно эта средняя величина $\sigma_{лок}$ ниже предела прочности, поэтому массового разрушения стали не наблюдается. Проанализировав распределение локальных напряжений, источниками которых являются стыки зерен феррита и перлита. Установлено, что распределение локальных полей напряжений простирается от 100 МПа до 1000 МПа. Это означает, что максимальные локальные поля напряжений в 1,5 раза превосходят предел прочности. Неудивительно поэтому, что в материале наблюдается локальное зарождение микротрещин и даже локальное расслоение материала в процессе приготовления фольги.

Методами электронной микроскопии была изучена структура при перемещении по образцу, от основного металла до зоны разрушения произошедшей по «мягкой прослойке». Было установлено, что наиболее серьезные изменения происходят в зоне термического влияния сварки.

В четвертой главе изложены результаты исследований влияния параметров микроструктуры на акустические характеристики и приведен разработанный комплексный критерий оценки ресурса сварных соединений ТУОПО.

Результаты, полученные спектрально-акустическим методом, подтверждаются методом растровой электронной микроскопии (рис. 5).

Как показали проведенные исследования, уже при качественном наблюдении зеренной структуры α -фазы видно, что зерна в основном металле существенно крупнее, чем в зоне термического влияния сварки и в материале шва. Количественные исследования показали (рис. 5, б), что средний размер зерна в зоне основного металла в 2,5 раза больше среднего размера зерна в зоне термического влияния сварки и почти в 5 раз больше среднего размера зерна в зоне металла шва.

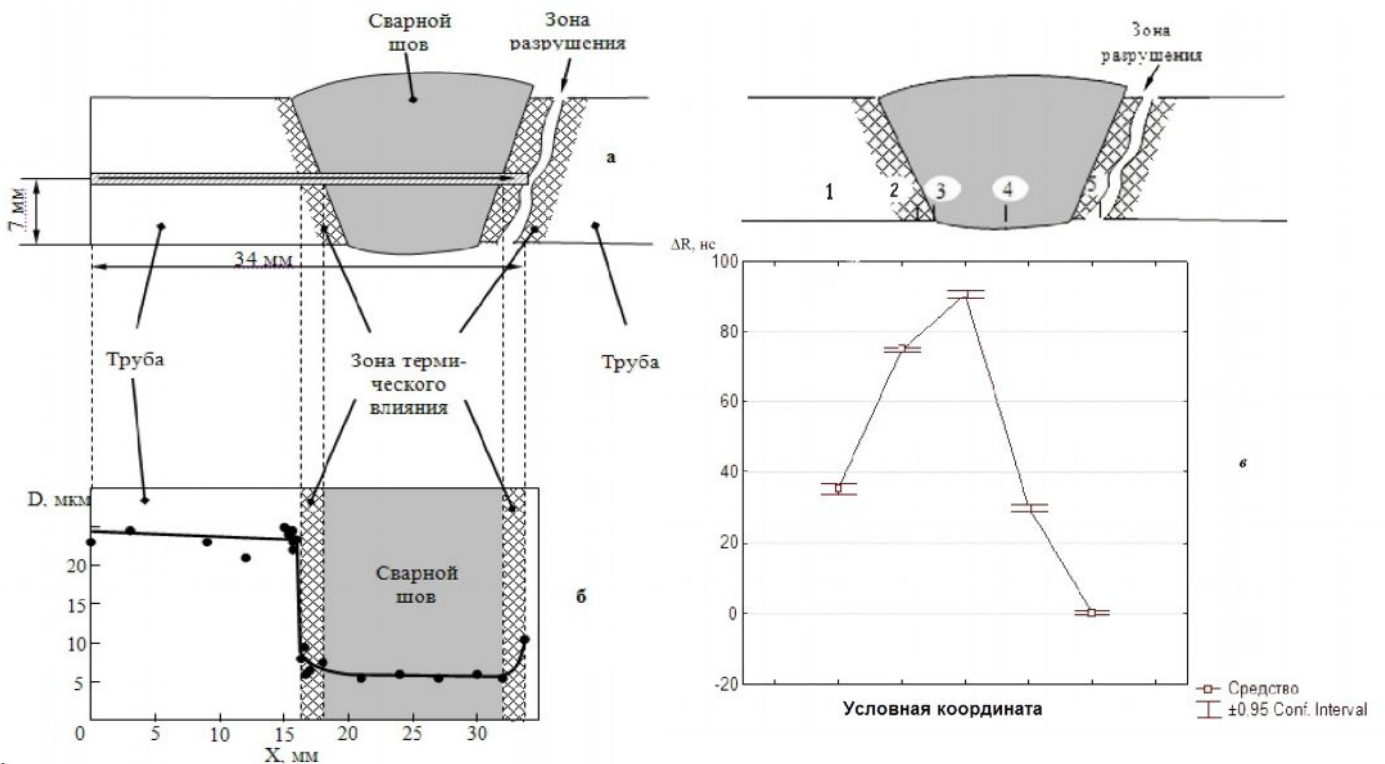


Рис. 5. Схема сварного соединения с указанием области, где проводилось: *а* – изучение зеренной структуры; *б* – изменение размера зерна (D) при перемещении по образцу в направлении от основного металла к зоне разрушения (X); *в* – изменения времени задержки ПАВ относительно сечения сварного шва

Кроме того видно, что средний размер зерна в зоне основного металла и в зоне материала шва при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения не изменяется (рис. 5, б). В зоне термического влияния размер зерна резко изменяется. Известно, что средний размер зерна является важной характеристикой, поскольку от него сильно зависят количественные параметры на более мелкомасштабных (структурных) уровнях в условиях как фазовых превращений, так и пластической деформации. А именно, от размера зерна зависят размеры структурных составляющих α -фазы, скалярная плотность дислокаций и амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки.

Поэтому следует ожидать, что именно в зоне термического влияния будут происходить кардинальные изменения параметров тонкой структуры. Что и подтверждают данные замеров величины времени задержки ПАВ в различных местах по сечению сварного соединения паропровода из стали 12Х1МФ. Наибольшее

время задержки импульсов ПАВ происходит на участке образца между зонами №2 и №3, т.е. в зоне термического влияния сварки (рис. 5, в).

Анализ поверхностного слоя сварного соединения показал, что здесь формируются дальнодействующие поля внутренних напряжений, вызванные появлением изгибных экстинкционных контуров, вследствие чего возрастает амплитуда локальных напряжений (рис.6). Последнее свидетельствует об увеличении в структуре сварного соединения количества концентраторов напряжений.

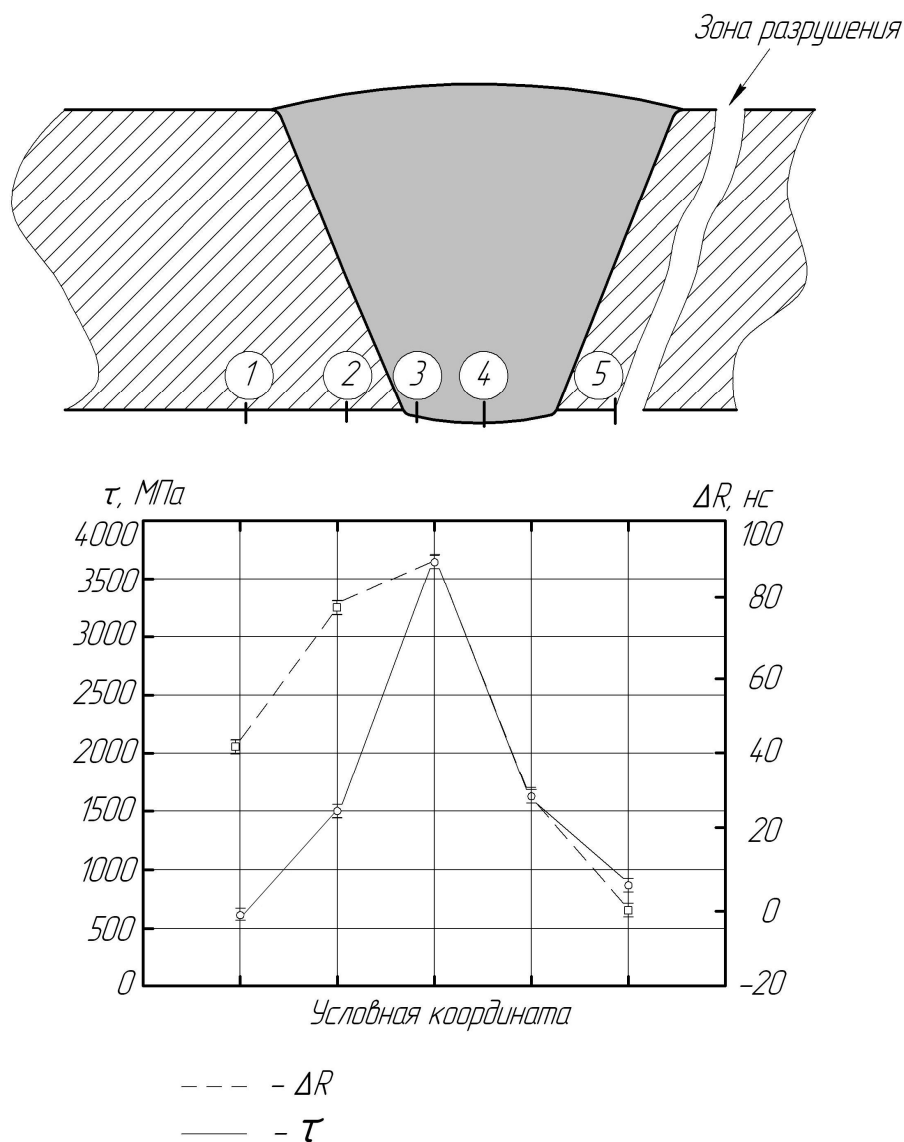


Рис. 6. Изменение средней по материалу амплитуды локальных (моментных) напряжений (τ) и времени задержки импульсов ПАВ (ΔR) при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения.

Анализ результатов исследования показывает высокую чувствительность спектрально-акустического метода к определению изменений параметров микроструктуры. Однотипность кривых изменения времени задержки ПАВ и локальных напряжений (которые непосредственно указывают на наиболее опасные места в объеме материала) свидетельствует о преобладающей роли локальных полей напряжений в изменении акустических характеристик.

Процесс накопления структурной поврежденности определяется комплексом факторов, связанных, как с технологией изготовления и термической обработкой, так и с условиями эксплуатации. Следовательно, учесть влияние всей совокупности технологических и эксплуатационных факторов при оценке структурного состояния сварных соединений на развитие разрушения можно лишь путем определения интегральной поврежденности и время задержки ПАВ является такой чувствительной характеристикой.

Все полученные результаты были учтены в разработке комплексного критерия оценки ресурса сварных соединений спектрально-акустическим методом.

Акустические характеристики регистрировали в одной зоне (точке) не менее 12 раз. При этом замерялось время задержки ПАВ на поверхности сварного соединения находящегося в исходном состоянии и на поверхности исследуемого сварного соединения. Под исходным состоянием сварного соединения понимается сварное соединение, выполненное из тех же основных и сварочных материалов, выполненное по той же технологии, что и контролируемое.

Разработан комплексный критерий оценки ресурса сварных соединений (K) в относительных единицах и выражается формулой:

$$K = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{t01} \cdot R_{t02}}, \quad (1)$$

где R_{01} – среднестатистическое время задержки ПАВ поляризованной вдоль сварного соединения (исходное состояние), нс;

R_{t01} – среднестатистическое время задержки ПАВ поляризованной вдоль сварного соединения контролируемых элементов, нс;

R_{02} – среднестатистическое время задержки ПАВ поляризованной перпендикулярно сварному соединению (исходное состояние), нс;

R_{t02} – среднестатистическое время задержки ПАВ поляризованной перпендикулярно сварному соединению контролируемых элементов, нс.

Комплексный критерий апробирован на ряде сварных соединений ТУОПО. Экспериментально доказано, что при $K \leq 0,98$ металл сварных соединений выработал свой ресурс и необходимо проведение ремонтно-восстановительных мероприятий (рис. 7).

Определение разницы между величинами времени задержки ПАВ сварных соединений в исходном и отработавшем определенный срок состояниях позволило судить о протекающих в них структурно-фазовых изменениях.

Применение критерия позволило наиболее точно определить ресурс длительно работающих сварных соединений.

Результаты исследований сварных соединений спектрально-акустическим методом положены в основу разработки методических рекомендаций по оценке ресурса сварных соединений трубопроводов объектов котлонадзора.

Методические рекомендации и комплексный критерий оценки ресурса сварных соединений реализованы при техническом диагностировании 62 сварных соединений трубопроводов совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

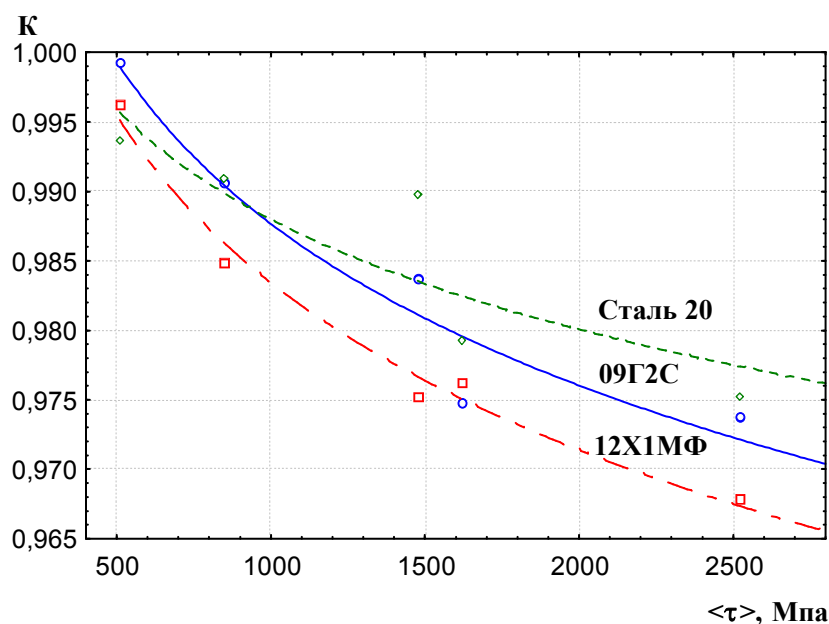


Рис. 7. Связь комплексного критерия оценки ресурса сварных соединений (K) с изменением средней амплитуды локальных (моментных) напряжений (τ)

Разработанные и внедренные на ОАО «Кузбассэнерго» Кузбасский филиал Томь-Усинская ГРЭС методические рекомендации по применению спектрально-акустического метода оценки ресурса сварных соединений позволили получить суммарный годовой экономический эффект 320 тысяч рублей.

Основные результаты и выводы

1. Разработана функциональная модель управления безопасной эксплуатацией сварных соединений ТУОПО на основе применения современного спектрально-акустического метода оценки ресурса. Новизной является установленные закономерности изменения акустических характеристик, дальностей действующих полей внутренних напряжений и амплитуды контуров кривизны-кручения кристаллической решетки.

2. Установлено, что основной фазовой составляющей (матрицей) сварного соединения стали 12Х1МФ является α -фаза. Морфологически α -фаза в различных образцах в общем случае присутствует в виде: 1) ферритных зерен (наименее дефектная часть материала); 2) фрагментированного феррита; 3) дефектного феррита (участки материала с высокой плотностью дислокаций и большой кривизной-кручения кристаллической решетки) и 4) участков материала, содержащих микротрещины.

3. Методами электронной микроскопии выявлены источники локальных полей внутренних напряжений в длительно работающих сварных соединениях: 1) поля, возникающие от избыточной плотности дислокаций внутри сетчатой и фрагментированной субструктур; 2) несовместность деформаций отдельных фрагментов и зерен (границы фрагментов и зерен); 3) частицы карбидных фаз, расположенные на границах и в стыках фрагментов; 4) крупные частицы карбида $M_{23}C_6$, находящиеся на границах зерен. Полученные результаты представляют со-

бой новые научные знания, которые использованы для оценки ресурса сварных соединений трубопроводов из углеродистых и теплоустойчивых сталей.

4. Установлена зависимость объемной доли структуры, содержащей дефектную α -фазу и микротрещины с полями внутренних напряжений. Максимальные локальные поля напряжений в 1,5 и более раз превосходят предел прочности, что приводит к локальному зарождению микротрещин в сварных соединениях.

5. Впервые установлено, что изменение структурно-фазового состояния сварных соединений в процессе эксплуатации приводит к изменению акустических характеристик. Доказано, что с увеличением локальных (моментных) полей внутренних напряжений (от 500 до 3600 МПа), происходит возрастание времени задержки ПАВ (до 90 нс). Спектрально-акустическим методом установлено, что максимальное время задержки ПАВ зафиксировано в зоне термического влияния сварки и вызвано ослаблением ультразвуковых колебаний на источниках локальных дальнodelствующих полей внутренних напряжений.

6. Разработана технология оценки ресурса, представленная в виде методических рекомендаций и комплексного критерия оценки ресурса сварных соединений, апробированная и внедренная при исследовании 62 сварных соединений трубопроводов совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность». Экспериментально доказано, что при $K \leq 0,98$ металл сварных соединений выработал свой ресурс.

7. Экономический эффект от внедрения методических рекомендаций на ОАО «Кузбассэнерго» Кузбасский филиал Томь-Усинская ГРЭС, составил 320 тысяч рублей.

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания

1. Смирнов А.Н., Фольмер С.В. Влияние исходной структуры и физико-механических свойств конструкционных сталей на их акустические характеристики// Вестник КузГТУ. – 2008. - №3. – С. 73-76.

2. Смирнов А.Н., Фольмер С.В., Абабков Н.В. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению// Вестник КузГТУ. – 2009. - №3. – С. 28-38.

3. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Фольмер С.В. Структурно фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности// Контроль диагностика. – 2009. - №1. – С. 22-32.

4. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Кононов П.В., Медведев С.Н., Фольмер С.В. Жаропрочность и поля внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях// Контроль диагностика. – 2009. - №2. – С. 45-51.

Публикации в монографиях

5. Смирнов А.Н., Фольмер С.В. Применение волн Релея для контроля поверхностного слоя сварного шва и основного металла, выполненного из стали

16М // Контроль. Диагностика. Ресурс. Сб. науч. тр. посвященный 60-летию проф. А.Н. Смирнова. – Кемерово, 2007. – С. 221-226.

6. Смирнов А.Н., Фольмер С.В., Абабков Н.В. Оценка структурно-фазового состояния и локальных полей внутренних напряжений в металле поврежденного сварного соединения паропровода Томь-Усинской ГРЭС, отработавшего сверхрасчетный срок//Диагностика и безопасность. Сб. науч. тр. посвященный 60-летию проф. Б.Л. Герике. – Кемерово, 2008. – С. 84-108

Другие издания

7. *A.N. Smirnov, V.V. Muravyov, S. V. Folmer* THE INFLUENCE OF THERMAL OPERATING MODES UPON THE DELAY TIME OF RAYLEIGH WAVES IN CHROMIUM-MOLYBDENUM-VANADIUM STEELS// Сборник статей по докладам Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства». - Тольятти: ТГУ, 2006 г. Ч.II.– С. 105-106.

8. Смирнов А.Н., Логов Б.Л., Фольмер С.В. Диагностика состояния основного металла и сварных соединений в фазовом пространстве физико-механических характеристик// Сборник статей по докладам Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства». - Тольятти: ТГУ, 2006 г. Ч.II.– С. 103-104.

9. Козлов Э.В., Смирнов А.Н., Конева Н.А., Попова Н.А., Лисицын К.А., Фольмер С.В. Структурно-фазовое состояние сварных соединений паропроводов, отработавших сверхрасчетный срок // Сварка и диагностика. №3 – Москва, 2008. – С. 8-15.

10. Фольмер С.В., Квак Г.И. Оценка квалификации специалиста сварочного производства I уровня в производственных условиях// Труды V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Российские модели образования и их интеграция в мировое образовательное пространство: прошлое и настоящее». - Юрга: ЮТИ ТПУ, 2007 г. – С. 244-248

11. Фольмер С.В. Определение предельного состояния сварных швов работающих на опасных производственных объектах акустическим методом// Труды VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении». - Юрга: ЮТИ ТПУ, 2008 г. – С. 62-63

12. Фольмер С.В., Абабков Н.В. Применение поверхностных акустических волн для исследования сварных соединений в машиностроении// Труды IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». Томск: ТПУ, 2008 г. – С. 345-346

13. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Попова Н.А., Лисицын К.А., Фольмер С.В., Николаенко Е.Л., Сизоренко Н.Р., Конева Н.А. Структура и фазовый состав материала паропроводов, отработавших сверхрасчетный срок// Труды Региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию общеобразовательного факультета ТГАСУ «Перспективные материалы и технологии». -Томск: ТГАСУ, 2009 г. – С. 72-85.

Фольмер Сергей Владимирович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 20.10.2009 г. Формат 60 x 84 1/16
Бумага офсетная. Печать ризографическая
Уч. изд. л. 1,5. Тираж 100. Заказ №127
Полиграфия ФГУ Кем. ЦНТИ
г. Кемерово, ул. Сарыгина, 29