На правах рукописи

ASOSKO?

Абабков Николай Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА СВАРНЫХ БАРАБАНОВ КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ

Специальность: 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» им. Т.Ф. Горбачева (ФГБОУ ВПО КузГТУ).

Кафедра «Технология машиностроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Смирнов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Штенников Василий Сергеевич

кандидат технических наук, старший

научный сотрудник

Пинаев Владимир Георгиевич

Ведущее предприятие ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский

Томский политехнический университет» Институт неразрушающего контроля

(НИ ТПУ ИНК)

Защита состоится «09» декабря 2011 г. в $10^{\underline{00}}$ на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ 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 ФГБОУ 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) 290-765; e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Автореферат разослан «____» ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

To tub

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В процессе длительной эксплуатации сварных барабанов котлов возникает ряд проблем, которые могут привести и приводят к аварийным ситуациям на электростанциях. В первую очередь это связано с тем, что в процессе длительной эксплуатации под воздействием конструкционнотехнологических и эксплуатационных факторов риска основной металл и сварные соединения барабанов котлов работают в сложнонапряженных условиях, требующих повышенного внимания к оценке ресурса и к качеству выполнения ремонтно-восстановительных работ. Кроме того, большая часть парка барабанов (85-90%) выработала свой ресурс и нуждается в полной замене. Однако современное состояние экономики в тепловой энергетике не позволяет своевременно проводить замену устаревшего оборудования.

В настоящее время оценка работоспособности барабанов котлов осуществляется преимущественно при помощи расчетных алгоритмов, которые не учитывают изменение структуры длительно работающего металла, а также процессы зарождения и накопления структурной поврежденности. Весьма актуальной становится задача совершенствования методов оценки ресурса длительно работающего основного металла, сварных соединений и наплавок после ремонтов барабанов котлов высокого давления на основе применения неразрушающих методов контроля. Все более широкое распространение получает концепция, основанная на «прогнозировании и предупреждении» вместо используемой концепции «обнаружение и устранение».

Методы неразрушающего контроля, применяемые в настоящее время, используются в основном для обнаружения существующих дефектов и не позволяют, в необходимой мере, определять степень изменения структуры основного и наплавленного металла в процессе длительной эксплуатации. В этом отношении перспективны акустические и магнитные методы. Измеряемые характеристики, такие как время задержки поверхностных акустических волн и интенсивность магнитного шума, чувствительны к изменениям структуры длительно работающего металла и зарождению микроповреждений, а также имеют связь с механическими свойствами материалов.

Цель работы — повышение эффективности оценки ресурса барабанов котлов высокого давления на основе раскрытия закономерностей изменения акустических и магнитных характеристик основного и наплавленного металла как результата трансформации структуры при сварке и после длительной эксплуатации.

Основная идея работы заключается в выявлении и использовании связей между структурным состоянием, локальными полями внутренних напряжений и акустическими и магнитными характеристиками для совершенствования технологии оценки ресурса барабанов котлов высокого давления.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Оценить с современных позиций характерные механизмы повреждений и существующие методы оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления.

- 2. Разработать функциональную модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления.
- 3. Разработать методики проведения экспериментальных исследований по оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления с применением акустических и магнитных методов.
- 4. Исследовать влияние изменения микроструктуры и локальных полей внутренних напряжений в длительно работающем основном и наплавленном металле барабанов котлов на акустические и магнитные характеристики.
- 5. Разработать акустический и магнитный критерии оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов и практические рекомендации по использованию разработанных критериев, апробировать их в промышленности.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1. Разработана функциональная модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления, представленная в виде информационной системы знаний и закономерностей, позволяющая оценивать ресурс исследуемого длительно работающего основного и наплавленного металла на основе проведения мероприятий по изучению микроструктуры и учитывающая комплекс физико-механических, акустических и магнитных характеристик.
- 2. Выявлены источники локальных полей внутренних напряжений в специальной молибденовой стали. Установлено влияние структурных изменений на акустические и магнитные характеристики в длительно работающем основном и наплавленном металле барабанов котлов.
- 3. Установлено, что с возрастанием локальных полей внутренних напряжений происходит рост значений времени задержки поверхностных акустических волн и микротвердости, уменьшение значений интенсивности магнитного шума вблизи трещин в длительно работающем основном металле барабанов, изготовленных из специальной молибденовой стали и в зоне термического влияния наплавки после ремонта трещин.
- 4. Показано, что термическая обработка, проведенная после ремонта сваркой перлитными электродами дефектных участков барабанов котлов высокого давления при температуре 650 °C, снизила уровень локальных полей внутренних напряжений в четыре раза в зоне линии сплавления.

Практическая ценность результатов работы:

- 1. Разработаны акустический и магнитный критерии оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления, которые применены при оценке состояния длительно работающего металла барабанов котлов № 1, 2 ОАО Южно-Кузбасская ГРЭС до и после ремонта сваркой.
- 2. Разработаны практические рекомендации по оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления, изготовленных из специальной молибденовой стали, стали 22К и 16ГНМ, которые нашли применение на ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС», ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго», ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность» и ООО «Кузбасский РИКЦ».

Достоверность результатов исследований

Результаты работы получены на основе базовой общенаучной методологии, структурного моделирования и синтеза, статистического и компьютерного моделирования и метода конечных элементов, что в целом обеспечило корректность постановки и решения задач. Сформулированные научные положения, результаты работы и выводы согласуются с общими представлениями теории акустоупругости, эффекта Баркгаузена и результатами исследований ведущих ученых и специалистов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- 1. Функциональная модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления.
- 2. Результаты исследований структуры, локальных полей внутренних напряжений и микротвердости длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления, изготовленных из специальной молибденовой стали.
- 3. Закономерности изменения времени задержки поверхностных акустических волн, интенсивности магнитного шума и микротвердости в зависимости от микроструктуры и локальных полей внутренних напряжений.
- 4. Акустический и магнитный критерии оценки ресурса длительно работающего и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления и практические рекомендации по использованию разработанных критериев в промышленности.

Реализация результатов работы.

Результаты научных исследований апробированы и внедрены в виде практических рекомендаций с суммарным годовым экономическим эффектом около 300 000 рублей в условиях ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС», ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго», ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность» и ООО «Кузбасский РИКЦ».

Результаты исследований включены в рабочие программы учебных дисциплин «Теоретические основы диагностики», «Контроль качества сварных соединений», «Остаточные напряжения и деформации при сварке» для бакалавров, обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства» (ТС).

Личный вклад автора заключается:

- 1. В разработке функциональной модели обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления и использовании ее для оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов.
- 2. В установлении закономерностей изменения времени задержки поверхностных акустических волн, интенсивности магнитного шума и микротвердости в зависимости от величины локальных полей внутренних напряжений в длительно работающем основном и наплавленном металле барабанов котлов высокого давления.
- 3. В разработке акустического и магнитного критериев и практических рекомендаций по оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления с применением акустических и магнитных методов.
- 4. Участие в разработке технологии восстановительного ремонта барабана котла высокого давления №2 (котел ПК-10) на ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС».

Апробация работы

Основные научные положения докладывались на Российских и международных конференциях: 53-й научно-практической конференции КузГТУ, Кемерово, 2008 г.; IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», Томск, 2008 г. I, II и III Всероссийской научно-практических конференциях «Россия молодая» КузГТУ, Кемерово, (2009-2011 гг.); VII Всероссийской научнопрактической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2009 г.; Международной научнопрактической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» Куз-ГТУ, Кемерово, 2009 г.; II и III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» г. Самара, 2010 и 2011 г.; II-ой Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» БНТУ, Минск, 2010 г.; I и II Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2010 и 2011 г.; I-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» г. Бийск, 2010 г.; Международной научно-практической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» БНТУ, Минск, 2011 г.; Всероссийской конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов», г. Иркутск, 2011 г.; II-ой Международной научнопрактической конференции «Инновации в машиностроении» г. Кемерово, 2011 г.

Комплексные исследования проводились в рамках грантов Министерства образования и науки РФ по проектам «Диагностирование наноструктурированного состояния основного металла и сварных соединений технических устройств опасных производственных объектов для предотвращения техногенных катастроф» (ГК № 02.740.11.0033 от 15 июня 2009 г.), «Формирование и трансформация наноструктурного состояния поверхностного слоя при комбинированной упрочняющей обработке и эксплуатации ответственных деталей машин» (ГК №П342 от 28 июля 2009 г.), «Инженерия поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин» (ГК $\stackrel{\frown}{\mathbb{N}}$ 02.740.11.5049 от 20 июля 2009 г.) Федеральной Целевой Программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., и по проекту «Научные основы технологического наследования наноразмерной дефектной структуры поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки, эксплуатации и восстановления ответственных деталей машин» Аналитической Ведомственной Целевой Программы «Научный потенциал Высшей Школы» в 2009–2011 гг., а также в рамках гранта по программе «У.М.Н.И.К.», тема проекта: «Разработка способа оценки остаточного ресурса металла барабана котла высокого давления с применением критерия степени поврежденности металла».

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 научных трудах (из которых 8 – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки $P\Phi$).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы из 182 наименований и 3 приложений. Работа содержит 215 страниц, в том числе 135 страницы основного текста, 77 рисунков, 11 таблиц и приложения на 60 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определен объект исследований, приведены цель, идея и задачи исследования. Изложены методы и оборудование, обеспечивающее достоверность исследований, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе подробно описано современное состояние парка барабанов котлов высокого давления. При анализе отечественных и зарубежных литературных источников по заявленной проблематике выявлено, что значительное количество барабанов выработало свой парковый ресурс и нуждается в современных методах оценки ресурса. При этом установлено, что наиболее часто разрушение рассматриваемых технических устройств происходит по коррозионно-термическому механизму, а из факторов, которые чаще всего приводят к разрушению можно выделить конструкционно-технологические и эксплуатационные. Кроме того установлено, что изменение микроструктуры, накопление структурной поврежденности, образование и развитие микротрещин в барабанах котлов при длительной эксплуатации происходит в первую очередь в поверхностных слоях. Показано, что те методы неразрушающего контроля, которые используются в настоящее время, не позволяют, в необходимой мере, определять степень изменения структуры основного и наплавленного металла барабанов котлов в процессе длительной эксплуатации. Установлено, что в этом отношении перспективны акустические и магнитные методы. Измеряемые характеристики, такие как время задержки поверхностных акустических волн и интенсивность магнитного шума, чувствительны к изменениям структуры длительно работающего металла, а также имеют связь с механическими свойствами материалов.

Другим важнейшим достоинством этих методов является возможность контроля поверхностных несовершенств в материалах. Как известно, накопление микроповрежденности, образование эксплуатационных микро- и макродефектов наблюдается чаще в поверхностных слоях, поэтому применение современных спектрально-акустического и магнитошумового методов приведет не только к их выявлению, но и к возможности оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления.

Вопросам обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления, оценки структурного состояния и ресурса, а также возможности применения акустических и магнитных методов посвящены работы ряда ведущих ученых и специалистов: Агиней Р.В., Аксельрод М.А., Алешина Н.П., Антикайн П.А., Бакунова А.С., Балаховской М.Б., Балашова Ю.В, Горкунова Э.С., Готальского Ю.Н., Гофман Ю.М., Гринь Е.А., Должанского П.Р., Дульнева Р.А., Земзина В. Н., Иванова В.И., Клюева В.В., Козлова Э.В., Коневой Н.А., Лифшица Л. С., Муравьева В.В., Поповой Н.А., Смирнова А.Н., Тулякова Г.А., Углова А. Л., Урюпиной Е.И., Хромченко Ф. А., Шрон Р.З., Щербинина В.Е. и др.

В результате анализа литературных источников выявлено, что существуют различия во взглядах разных исследователей в подходах к оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов. Следовательно, необходимо провести комплекс мероприятий по систематизации информации о спектрально-акустическом и магнитошумовом методах, аналитиче-

ских и экспериментальных исследованиях по выявлению связей между микроструктурой и акустическими и магнитными характеристиками.

Во второй главе описана функциональная модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления и методики экспериментальных исследований с применением акустических и магнитных методов для оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов.

Функциональная модель разработана на основе ранее предложенной проф. Смирновым А.Н. модели управления безопасной эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов. Модель представляет собой систему знаний и закономерностей, позволяющую целенаправленно определять ресурс длительно работающего основного и наплавленного металла на основе выполнения процедур, учитывающих совокупность физико-механических, акустических и магнитных характеристик, а также условий эксплуатации барабанов котлов высокого давления.

Отличительная особенность разработанной модели заключается в постепенном введении все больших уровней детализации по мере создания диаграмм, отображающих модель. Декомпозиция модели до уровня стадий и этапов выполнения экспертизы и разработки акустического и магнитного критериев оценки ресурса длительно работающего и наплавленного металла барабанов котлов показана на рис. 1. В разработанной модели исходными данными для определения состояния длительно работающего основного и наплавленного металла по акустическим и магнитным характеристикам является совокупность используемых неразрушающих методов контроля (КМ).

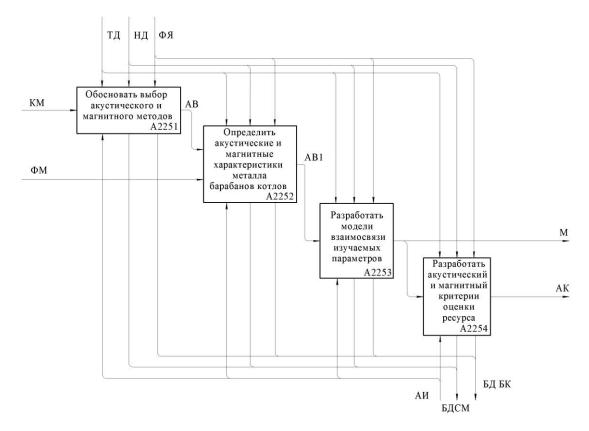


Рис. 1. Декомпозиция функциональной модели определения состояния длительно работающего основного и наплавленного металла по акустическим и магнитным характеристикам (декомпозиция блока A225)

Для определения состояния металла по акустическим и магнитным характеристикам необходимо обосновать выбор акустического и магнитного методов (блок A2251). Затем нужно измерить акустические и магнитные характеристики в длительно работающем основном и наплавленном металле барабана котла (блок A2251). Результаты измерений акустических, магнитных и физико-механических (ФМ) характеристик передаются по (АВ1) в блок (А2253), где разрабатываются модели взаимосвязи измеренных параметров. Математические модели (М) связаны с блоком (А2254) для разработки акустического и магнитного критериев оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабана котла (АК). Процесс измерения акустических и магнитных характеристик (АИ) осуществляется под управляющим воздействием физико-химических явлений (ФЯ), произошедших в исследуемом металле за определенный период наработки, а также нормативной и технической документации (НД, ТД).

Показано, что между разными блоками разработанной модели имеют место связи, требующие специальных исследований. В работе выполнено подробное исследование этих связей. Разработанная функциональная модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления дает представление о существующем и предлагаемом в настоящей работе подходах к оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления.

Для подтверждения гипотезы о закономерностях изменения акустических и магнитных характеристик в зависимости от структурного состояния (локальных полей внутренних напряжений) длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов был проведен комплекс исследований.

Изучали основной и наплавленный металл барабанов пяти котлов Южно-Кузбасской ГРЭС, трех котлов Томь-Усинской ГРЭС, двух котлов Новокемеровской ТЭЦ и Кемеровской ГРЭС (в каждом барабане изучали кольцевые швы, основной металл и 36 мостиков между отверстиями водоопускных труб). Барабаны изготовлены из специальной молибденовой стали, стали 22К и 16ГНМ. Срок эксплуатации котлов составлял от 200 до 350 тыс. часов. Для детального исследования были выполнены вырезки поврежденного металла с трещинами из мостиков между водоопускными отверстиями барабанов котлов высокого давления № 1, 2 Южно-Кузбасской ГРЭС после 320 и 350 тыс. часов эксплуатации соответственно.

Для анализа состояния длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов были использованы неразрушающие методы контроля (ультразвуковая, магнитная и цветная дефектоскопия). Химический состав металла исследуемых образцов определяли в соответствии с ГОСТ 5639-82. Механические характеристики образцов длительно-работающего основного и наплавленного металла определяли по ГОСТ 6996-66. Характер микроструктуры и фазовое состояние исследовали методами оптической, просвечивающей, растровой и электронной микроскопии. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа. Время задержки поверхностных акустических волн измеряли спектрально-акустическим методом с помощью многофункциональной акустической системы «АСТРОН». Магнитные шумы фиксировали анализатором напряжений и структуры металлов «ИНТРОСКАН», основанном на эффекте Баркгаузена.

В металловедческих экспериментах была использована следующая аппаратура: для метода просвечивающей электронной микроскопии — электронный микроскоп ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ; для метода растровой электронной микроскопии — электронный микроскоп Tesla BS-301 при рабочих увеличениях 200-2000 крат и для метода рентгеноструктурного анализа — рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 с использованием Си-Кь рентгеновского излучения высокой интенсивности. Методами электронной микроскопии определялись следующие параметры: средний размер зерен, параметры кристаллической решетки, скалярная и избыточная плотность дислокаций, локальные поля внутренних напряжений.

При измерении акустических и магнитных характеристик исследуемая поверхность была поделена на участки в форме прямоугольников, затем регистрировали значения времени задержки поверхностных акустических волн и интенсивности магнитного шума. Для учета анизотропии акустических и магнитных характеристик датчик устанавливали как вдоль, так и поперек поверхности образцов, измерения выполняли в каждой точке не менее 12 раз. Полученные данные анализировались при помощи программной среды «Statistica».

В третьей главе детально описана структура и локальные поля внутренних напряжений в длительно работающем основном и наплавленном металле барабанов котлов, изготовленных из специальной молибденовой стали до и после ремонта сваркой.

Методами электронной микроскопии установлено, что в составе исследуемого материала (металл барабана котла до ремонта сваркой рядом с трещиной) выявлена α -фаза — феррит (твердый раствор углерода в α -Fe) и карбид железа (цементит Fe₃C). Обе фазы слабо легированы. Морфологически присутствует три компонента: феррит, карбид железа и перлит, состоящий из смеси α -фазы и карбида железа. Обнаружены микротрещины на кромках разрыва и на расстоянии до 1,0 мм от берегов магистральной трещины (рис. 2). Максимальная плотность микротрещин находится на расстоянии до 0,2 мм от разрыва и достигает N~10³ см⁻¹. Микротрещины расположены, преимущественно: 1) по границам фрагментов, 2) перерезают карбидные частицы, 3) по границам зерен.

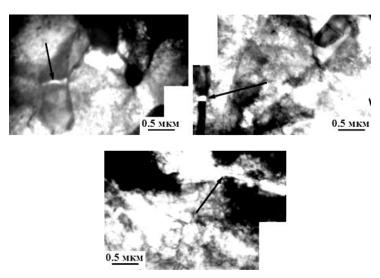


Рис. 2. Микротрещины (показаны стрелками) в длительно работающем основном металле барабанов котлов, специальная молибденовая сталь

В стали присутствует один тип карбидов — цементит Fe_3C . Цементит, кроме перлита, присутствует в зернах феррита в двух состояниях. Во-первых, это частицы цементита, присутствующие по границам зерен феррита. Во-вторых, цементит находится внутри зерен феррита — ферритокарбидная смесь.

Исследованный металл имеет три типа субструктур: 1) сетчатая субструктура; 2) фрагментированная субструктура; 3) субструктура разрушения. Средний размер фрагментов вблизи зоны разрыва имеет минимальное значение (\sim 2,5 мкм). Во всех остальных точках его величина почти в 2 раза выше и практически не меняется (рис. 3, кривая I).

Дислокационная структура в зоне разрушения представлена сетчатой субструктурой, изотропными и анизотропными фрагментами с сетчатой структурой. Объемные доли их практически равны. Исключение составляет участок на расстоянии 1,0 мм от трещины. Наивысшие значения скалярной плотности дислокаций, как и микротвердости, определены вблизи зоны разрыва (рис. 3, кривые 2 и 4).

Определены источники локальных полей внутренних напряжений. Это крупные частицы цементита по границам и в стыках зерен; карбиды по границам фрагментов; несовместность деформаций по границам зерен и фрагментов.

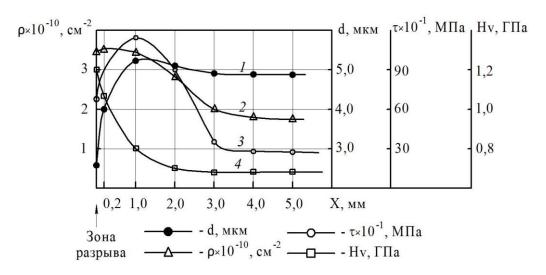


Рис. 3. Изменение структурных характеристик специальной молибденовой стали по мере удаления от макротрещины: среднего размера фрагментов (1); скалярной плотности дислокаций средней по материалу (2); локальных полей внутренних напряжений, измеренных методом просвечивающей электронной микроскопии (3); микротвердости (4)

Значения локальных полей внутренних напряжений рядом с разрывом весьма велики (рис. 3, кривая 3) и достигают 900 МПа. Из чего следует, что источники локальных полей внутренних напряжений могли стать причиной зарождения микротрещин. Видно (рис. 3), что величина локальных полей внутренних напряжений максимальна на расстоянии 1,0 мм от кромок разрыва, т.е. там, где многие характеристики тонкой структуры имеют отличительные особенности от остальных участков исследованного металла.

После ремонта сваркой дефектного участка барабана перлитными электродами по специальной технологии микротрещины в основном и наплавленном металле, а также в ЗТВ не обнаружены. Значение локальных полей внутренних напряжений на участке рядом с линией сплавления достигает 400–500 МПа. Это

моментные локальные поля внутренних напряжений и они не обязательно могут привести к образованию микротрещин в процессе эксплуатации барабана. Значение микротвердости на этом же участке составляет 1,081 ГПа. По мере удаления от линии сплавления в ЗТВ и в основной металл, а также в наплавку — значение локальных полей внутренних напряжений уменьшается и достигает 200—300 МПа. Значение микротвердости так же постепенно уменьшается до 0,76 ГПа при удалении от линии сплавления. Восстановительная термическая обработка, проведенная после ремонта (при 650 °C), снизила уровень локальных полей внутренних напряжений в ЗТВ в четыре раза до 120 МПа.

В четвертой главе описаны результаты исследования закономерностей изменения акустических и магнитных характеристик в зависимости от микроструктуры и разработанные акустический и магнитный критерии оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления. Ранее, методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что вблизи берегов трещины произошли кардинальные изменения микроструктуры (рис. 4, *a*). Поэтому при анализе результатов, полученных спектрально-акустическим и магнитошумовым методами, особое внимание было уделено именно этим зонам (рис. 4).

Установлено, что наибольшее время задержки импульсов поверхностных акустических волн (до 150 нс) (рис. 4, δ , кривая 2) и наименьшее значение интенсивности магнитного шума (снижение на 140 единиц) наблюдается на участке образца вблизи зоны разрыва (рис. 4, δ , кривая 3).

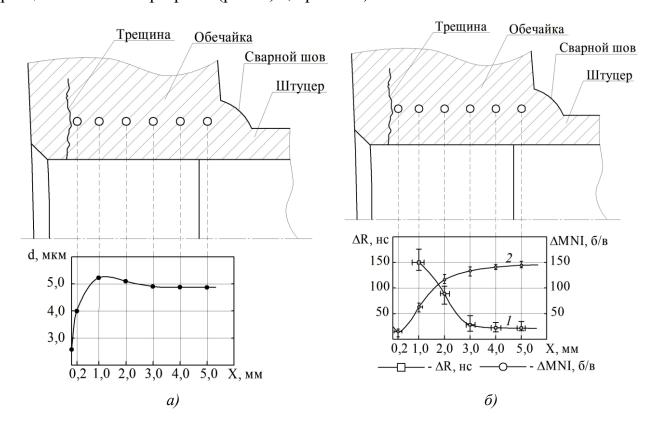


Рис. 4. Схема образца с повреждением и с указанием зон, где проводились измерения: a — размера зерна (d, мкм) при перемещении по образцу в направлении от зоны трещины к основному металлу (X); δ — времени задержки поверхностных акустических волн (I) и интенсивности магнитного шума (2) относительно сечения образца

Результаты исследований свидетельствуют о высокой чувствительности спектрально-акустического и магнитошумового методов к изменению микроструктуры. Зависимость между изменениями времени задержки поверхностных акустических волн (рис. 5, кривая 3), микротвердости (рис. 5, кривая 2), интенсивности магнитного шума (рис. 5, кривая 4) и величиной локальных полей внутренних напряжений (рис. 5, кривая 1) свидетельствует о том, что структурная трансформация играет важную роль в изменении акустических и магнитных характеристик.

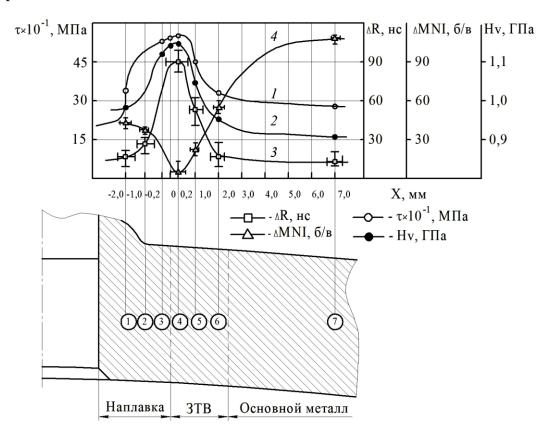


Рис. 5. Изменение величины локальных полей внутренних напряжений, измеренных методом просвечивающей электронной микроскопии (1), микротвердости (2), времени задержки поверхностных акустических волн (3) и интенсивности магнитного шума (4) в специальной молибденовой стали по мере удаления от центра шва к основному металлу

Накопление структурной поврежденности в длительно работающем основном и наплавленном металле связано, преимущественно, с условиями эксплуатации барабанов котлов. Для учета влияния всех факторов, приводящих к накоплению поврежденности, при оценке структурного состояния длительно работающего основного и наплавленного металла, необходимо определить величину интегральной поврежденности. Время задержки поверхностных акустических волн и интенсивность магнитного шума, являясь чувствительными характеристиками к изменению микроструктуры, могут применяться для определения величины интегральной поврежденности.

На основе измерений времени задержки поверхностных акустических волн и интенсивности магнитного шума были разработаны критерии оценки ресурса ос-

новного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления ($F_{\scriptscriptstyle M}$ и $F_{\scriptscriptstyle C}$) в относительных единицах, которые выражаются формулами:

1. Акустический критерий:

$$F_c = \gamma \cdot K_C^{-1}, \tag{1}$$

где K_C - коэффициент, учитывающий анизотропию акустических характеристик и выражается формулой:

$$K_C = \frac{\Delta R_1}{\Delta R_2},\tag{2}$$

 γ — коэффициент, учитывающий изменение величины локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле и выражается формулой:

$$\gamma = \frac{\tau_{\scriptscriptstyle GH}^0 - \tau_{\scriptscriptstyle GH}}{\tau_{\scriptscriptstyle GH}},\tag{3}$$

где $au_{_{\mathit{вн}}}^{^{0}}$ — величина локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле до ремонта, $au_{_{\mathit{вн}}}$ — величина локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле после ремонта.

В формуле (2) ΔR_1 и ΔR_2 — анизотропия времени задержки поверхностных акустических волн в металле после ремонта и в длительно работающем металле до ремонта соответственно. Данные величины рассчитываются как:

$$\Delta R_1 = \left| \Delta \overline{R}_1^{nepn} - \Delta \overline{R}_1^{nap} \right| \quad \Delta R_2 = \left| \Delta \overline{R}_2^{nepn} - \Delta \overline{R}_2^{nap} \right|. \tag{4}$$

2. Магнитный критерий:

$$F_M = \gamma \cdot K_M^{-1},\tag{5}$$

где K_M - коэффициент, учитывающий анизотропию магнитных характеристик и выражается формулой:

$$K_{M} = \frac{\Delta M N I_{1}}{\Delta M N I_{2}},\tag{6}$$

 γ — коэффициент, учитывающий изменение величины локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле и выражается формулой (5).

В формуле (6) ΔMNI_1 и ΔMNI_2 — анизотропия интенсивности магнитного шума в металле после ремонта и в длительно работающем металле до ремонта соответственно. Данные величины рассчитываются как:

$$\Delta MNI_{1} = \left| \Delta \overline{MNI}_{1}^{nepn} - \Delta \overline{MNI}_{1}^{nap} \right|, \ \Delta MNI_{2} = \left| \Delta \overline{MNI}_{2}^{nepn} - \Delta \overline{MNI}_{2}^{nap} \right|. \tag{7}$$

Экспериментально установлено, что при значении коэффициента, учитывающего изменение величины локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле γ >0,13, металл находится в критическом состоянии, при этом K_C должен находиться в пределах 0,64< K_C <1, а K_M должен находиться в пределах 0< K_M <0,5. Расчеты F_c и F_M показали, что при F_c >0,22 и при F_M >0,27, исследуемый металл барабана котла находится в стадии предразрушения (рис. 6).

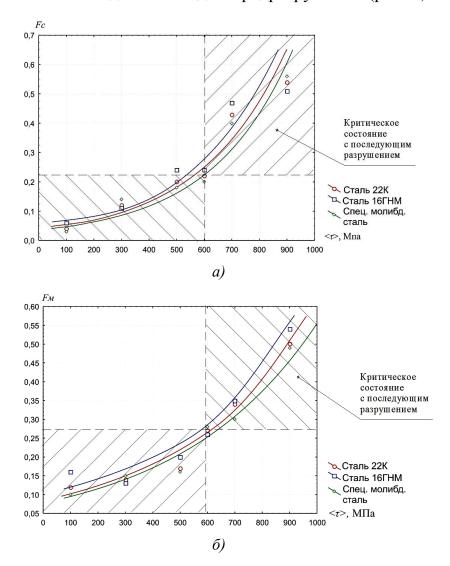


Рис. 6. Связь спектрально-акустического $F_C(a)$ магнитошумового $F_M(\delta)$ критериев оценки ресурса металла с изменением величины локальных полей внутренних напряжений ($<\tau>$)

Использование разработанных критериев дало возможность без длительных испытаний проводить оценку ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления. Результаты исследований металла спектрально-акустическим и магнитошумовым методами легли в основу практических рекомендаций по оценке ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления.

Практические рекомендации, а также акустический и магнитный критерии оценки ресурса основного и наплавленного металла барабанов котлов нашли применение при техническом диагностировании металла зон водоопускных отверстий и сварных соединений больших барабанов котлов высокого давления, изготовлен-

ных из специальной молибденовой стали, сталей 22К и 16ГНМ на ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС» и на Новокемеровской ТЭЦ совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго». Разработанные практические рекомендации по применению акустического и магнитного методов оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления были апробированы на ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС», что позволило получить суммарный годовой экономический эффект около 300 тыс. руб.

Основные результаты и выводы:

- 1. Оценены характерные механизмы повреждений и существующие методы оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления. Разработана функциональная модель обеспечения безопасной эксплуатации барабанов котлов высокого давления, изготовленных из специальной молибденовой стали, сталей 22К и 16ГНМ, представленная в виде информационной системы знаний и закономерностей, позволяющая оценивать ресурс исследуемого длительно работающего основного и наплавленного металла на основе проведения мероприятий по изучению микроструктуры и учитывающая комплекс физико-механических, акустических и магнитных характеристик.
- 2. Разработаны методики экспериментальных исследований для оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления с применением современных спектрально-акустического и магнитошумового методов контроля и учетом анизотропии акустических и магнитных характеристик.
- 3. Выполнена оценка величины локальных полей внутренних напряжений в образцах поврежденного длительно работающего основного металла барабанов котлов высокого давления, которая составляет рядом с зоной разрыва на расстоянии 1,0 мм от трещины свыше 900 МПа и снижается до 280 МПа по мере удаления от берегов трещины на расстояние 5 мм. Электронно-микроскопические исследования показали, что для специальной молибденовой стали источниками локальных полей внутренних напряжений являются: крупные частицы цементита по границам и в стыках зерен; карбиды по границам фрагментов; несовместность деформаций по границам зерен и фрагментов.
- 4. Установлено, что величина локальных полей внутренних напряжений после ремонта сваркой перлитными электродами дефектных участков барабанов котлов высокого давления на участке рядом с линией сплавления достигает 400—500 МПа. По мере удаления от линии сплавления в ЗТВ и в основной металл, а также в наплавку, значение локальных полей внутренних напряжений уменьшается и достигает 200—300 МПа. Показано, что термическая обработка, проведенная при температуре 650° С, снизила уровень локальных полей внутренних напряжений в четыре раза, до 120 МПа рядом с линией сплавления.
- 5. Установлено, что увеличение локальных полей внутренних напряжений в длительно работающей специальной молибденовой стали до 900 МПа (в зоне трещин) приводит к возрастанию величины времени задержки поверхностных акустических волн (до 160 нс) и уменьшению величины интенсивности магнитного шума (на 150 единиц). Определено, что для наплавленного металла при значении локаль-

ных полей внутренних напряжений вблизи линии сплавления 400–500 МПа, величина времени задержки поверхностных акустических волн возрастает до 90 нс, а величина интенсивности магнитного шума уменьшается на 85 единиц по сравнению с основным металлом.

- 6. Разработаны акустический $F_c = \gamma \cdot K_C^{-1}$ и магнитный $F_M = \gamma \cdot K_M^{-1}$ критерии оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла сварных барабанов котлов. Установлено, что при значении коэффициента, учитывающего изменения величины локальных полей внутренних напряжений в исследуемом металле $\gamma > 0,13$, металл находится в критическом состоянии, при этом K_C должен находиться в пределах $0,64 < K_C < 1$, а K_M должен находиться в пределах $0 < K_M < 0,5$. Расчеты F_c и F_M показали, что при $F_c > 0,22$ и при $F_M > 0,27$, исследуемый металл барабана котла находиться в стадии предразрушения.
- 7. Усовершенствованная технология оценки ресурса длительно работающего основного и наплавленного металла сварных барабанов котлов, представленная в виде практических рекомендаций и критериев (акустического и магнитного), апробирована и внедрена при исследовании металла зон водоопускных отверстий больших барабанов котлов высокого давления №1, 2 на ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС», что позволило получить суммарный годовой экономический эффект около 300 тыс. руб.

Основные результаты работы отражены в 23 работах, наиболее значимыми из которых являются:

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания:

- 1. Смирнов, А. Н. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению / А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер, Н. В. Абабков // Вестн. КузГТУ. 2009. №3. С.28–38.
- 2. Смирнов, А. Н. Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Вестн. КузГТУ. 2010. №2. С.12–17.
- 3. Смирнов, А. Н. Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Извест. Сам. науч. центра РАН. 2010. Т. 12, №1 (2). С.520-524.
- 4. Смирнов, А. Н. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. №4. С.62–68.
- 5. Абабков, Н. В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. № 5. С. 101–106.
- 6. Абабков, Н. В. Оценка состояния наплавленного металла барабана котла высокого давления по коэрцитивной силе металла / Н. В. Абабков, А. Н. Смирнов, А.И. Копытов и др. // Вестн. КузГТУ. 2011. № 2. С. 57–60.
- 7. Смирнов, А. Н. Исследование структуры и свойств металла барабана котла высокого давления после ремонтной наплавки / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н.А. Конева, Н.А. Попова, В.Л. Князьков, Н. В. Абабков // Извест. Сам. науч. центра РАН. 2010. Т. 13, №1 (2). С.492–496.
- 8. Смирнов, А. Н. Микроструктура, акустические характеристики и поля внутренних напряжений в поврежденном металле барабана котла ПК-10 до и после ремонта сваркой / Смирнов А. Н., Козлов Э. В., Конева Н. А., Князьков В.Л., Абабков Н.В., Попова Н.А. // Сварка и диагностика. 2011. №3. С. 39—42.

Другие издания:

- 1. Абабков, Н.В.Применение спектрально-акустического метода контроля для оценки напряженно-деформированного состояния металла элементов энергетического и металлургического производства / Сб. труд. по результатам І Всероссийской, 54 конференции «Россия молодая», ГУ КузГТУ. Кемерово, 2009. С. 24–30.
- 2. Фольмер, С. В. Применение спектрально-акустического метода для выявления мест локальных напряжений в металлоконструкциях работающих на объектах подконтрольных Ростехнадзору / С. В. Фольмер, Н. В. Абабков, А. Н. Безруков // труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» Томск: Издательство ТПУ, 2009. С.27–30.
- 3. Смирнов, А. Н. Длительная прочность хромомолибденованадиевых сталей, поля внутренних напряжений и их оценка акустическим методом / А. Н. Смирнов, Н. А. Конева, Э. В. Козлов, В. В. Муравьев, Н. В. Абабков // Сб. труд. МНПК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. С. 401–434.
- 4. Смирнов, А. Н. Выявление «мягких прослоек» в сварных соединениях на различных этапах их жизненного цикла акустическим методом / А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер, Н. В. Абабков // Сб. труд. МНПК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». Кемерово: ГУ Куз-ГТУ, 2009. С. 435–457.
- 5. Смирнов, А. Н. Оценка состояния поверхностного слоя сварного шва и основного металла барабана котла высокого давления с применением волн Релея / А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер, Н. В. Абабков // Сб. труд. МНПК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. С. 458–468.
- 6. Фольмер, С. В. Сравнение характеристик поверхностных акустических волн в металле барабанов котлов до и после ремонта / С. В. Фольмер, Н. В. Абабков // Сб. труд. Всероссийской конференции «Актуальные проблемы современного материаловедения. Томск: Издательство ТПУ, 2009 С. 147—151.
- 7. Фольмер, С. В. Способы восстановления работоспособности и регенерации структуры и свойств металла технических устройств опасных производственных объектов / С. В. Фольмер, Н. В. Абабков // Сб. труд. МНПК «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» Томск: Издательство ТПУ, 2010. С.88–91.
- 8. Абабков, Н. В. Выявление поверхностных микроповрежденностей основного металла и сварных соединений на объектах котлонадзора спектрально-акустическим методом / Н. В. Абабков, А. О. Хасанов, А. А. Качаев // Сб. труд. II-ой МНПК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». Минск: БНТУ, 2010. С. 253–256.
- 9. Абабков, Н. В. Пути повышения эксплуатационной надежности элементов энергетического машиностроения / Н. В. Абабков, А. В. Маковкин // Сб. труд. по результатам II Всероссийской, 55 конференции «Россия молодая», ГУ КузГТУ. Кемерово, 2010. С. 214–216.
- 10. Smirnov, A.N. Estimation of structural-phase condition of welded joints by spectral-acoustic method // A. N. Smirnov, V. V. Muraviev, S. V. Folmer, N. V. Ababkov // 10^{th} European Conference on Non-destructive Testing. Moscow, 2010. P.126.
- 11. Абабков, Н. В. Применение волн Релея для оценки влияния различных типов микро и макродефектов на напряженно-деформированное состояние металла / Н. В. Абабков, С. В. Фольмер, А. Н. Безруков // Сб. труд. І-ой МНПК «Инновации в машиностроении», БТИ. Бийск: Издво Алт. гос. техн. ун-та, 2010. С.18–21.
- 12. Смирнов, А. Н. Применение магнито-шумового метода контроля для оценки качества наплавленного металла / А. Н.Смирнов, Н. В. Абабков // сб. науч. тр. Всероссийской конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов», ИрГТУ. Иркутск, 2011. С. 194–198.
- 13. Князьков, В. Л. Восстановительный ремонт корпусных деталей энергетического оборудования наплавкой модулированным током / В. Л. Князьков, А. Ф. Князьков, А Н. Смирнов, Н. В. Абабков // сб. науч. тр. Всероссийской конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов», ИрГТУ. Иркутск, 2011. С. 203–207.

Подписано в печать ___.__.2011. Формат $60\times84/16$ Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100. Заказ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» им. Т.Ф. Горбачева (ФГБОУ ВПО КузГТУ)

650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Типография федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Кузбасский государственный технический университет» им. Т.Ф. Горбачева (ФГБОУ ВПО КузГТУ) 650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А