На правах рукописи

АБУ ГАЗАЛ АЙМАН АХЕД

РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

26 ДЕК 2018

008719417

Москва 2019

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Сурин Виталий Иванович,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Проскуряков Константин Николаевич,
профессор кафедры атомных электрических станций НИУ МЭИ, г. Москва

Кандидат технических наук, главный научный сотрудник,
Воронкова Любовь Владимировна
АО НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт атомных электростанций (ВНИИАЭС), г. Москва

Защита состоится «30» января 2019 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « » декабря 2018 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.130.04,
доктор физико-математических наук, профессор И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Опыт эксплуатации коррозионностойких сталей в реакторных установках показывает, что рабочие напряжения от давления и температуры рабочей среды в течение длительной эксплуатации приводят к возникновению и развитию разного рода повреждений.

В настоящее время серьезной проблемой безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М реакторных установок ВВЭР-1000 является коррозионное растрескивание в узле сварного соединения № 111. При появлении микроскопических трещин или несплошностей в этом узле дальнейшая эксплуатация парогенераторной установки может привести к ее разрушению. Поэтому решение задачи обнаружения дефектов на ранней стадии развития позволит поднять уровень безопасности эксплуатации, а также предотвратить высокие материальные издержки в случае выхода ее из строя.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью реализации энергетической стратегии развития Российской Федерации до 2035 года. В документе, описывающем данную стратегию развития, поставлена задача повышения уровня безопасной эксплуатации энергетического оборудования.

Разработанный метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) открывает широкие практические возможности для исследования поверхностных напряжений и деформаций, изучения механизмов пластической деформации, стадий развития внутренних дефектов вплоть до разрушения материала, и других физических процессов в режиме реального времени. Информативный электрический сигнал образуется на пятнах контакта преобразователя с объектом контроля, при этом поверхность механического контакта представляет собой чувствительный элемент электрофизического преобразователя. Число пятен контакта преобразователя определяется интенсивностью контактного взаимодействия в зоне контакта и процессами, протекающими в этой зоне, и существенно зависит от качества поверхности, а также параметров динамической волнистости и шероховатости.

На сегодняшний день перечень применяемых методов неразрушающего контроля оборудования АЭС включает ультразвуковой, радиографический, вихретоковый, капилярный и ряд других известных методов.

По сравнению с ними метод и средства СКП имеют важные преимущества: высокую чувствительность к структурным дефектам; малую массу и габариты преобразователей, обусловленные малыми линейными размерами пятен контактов; высокую надежность и воспроизводимость результатов измерений; высокую пожаробезопасность, связанную с отсутствием в конструкциях датчиков сильноточных цепей и нагреваемых областей; низкий по амплитуде уровень полезного сигнала и отсутствие, в связи с этим, искрений в механических контактах. Экспресс-метод СКП обеспечивает возможность проведения как одноточечных, так и распределенных массивов измерений, в том числе с использованием частотно-временного мультиплексирования чувствительных элементов, расположенных на удаленных участках объекта контроля. Система обработки потока поступающей информации содержит программные коды временного и спектрального анализа.

При выборе объекта контроля в работе особое внимание было уделено проблемам, возникающим при эксплуатации парогенератора ПГВ 1000М, выполненного из стали 10ГН2МФА. Главная причина повреждения коллекторов связана с образованием в них трещин различной протяженности. Поэтому объектом неразрушающего контроля выбраны сварные соединения приварки коллектора первого контура к корпусу парогенераторов ПГВ 1000М РУ ВВЭР-1000.

Цель диссертационной работы

Разработка метода неразрушающего контроля сварных соединений приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора ПГВ 1000 М на стадии предэксплуатаци-

онного контроля для оценки соответствия состояния сварного соединения установленным требованиям, включая измерительные средства, средства отображения и обработки результатов контроля.

Задачи диссертационной работы

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Разработана методика выполнения электрофизического неразрушающего контроля (ЭФК) сварного соединения приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора в условиях действующего производства.
- Разработаны датчики ЭФК и измерительные устройства, исходя из геометрии, размеров объекта контроля и условий проведения контроля.
- Разработано программное обеспечение для представления и анализа результатов контроля.
- Выполнены метрологические требования точности и единства измерений при контроле состояния металла сварного соединения.
- Выполнен ЭФК сварных соединений приварки коллектора первого контура к корпусу парогенераторов ПГВ 1000М, находящихся в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке АО «АЭМ-Технологии» «Атоммаш».
- Проведен амплитудный и частотный анализ результатов контроля с помощью построения временных, поверхностных потенциограмм и спектров сигналов, определены диапазоны изменения амплитуды сигналов, необходимые для эффективного выявления структурных нарушений.
- Выполнена идентификация структурных нарушений сварных соединений парогенераторов ПГВ 1000М и дано заключение об их текущем состоянии.
- Верифицированы полученные результаты ЭФК путем сравнения их с результатами других методов НК и проведения специальных экспериментов.
- Сформулированы рекомендации по составлению программ ЭФК для выявления и фиксации несплошностей, и использования их на стадии предэксплуатационного контроля парогенераторов.

Научная новизна работы

1. Выявлены и систематизированы особенности изменения разности электрических потенциалов в зависимости от состояния сварного соединения парогенераторов ПГВ 1000М и режимов их контроля. Использование внешнего электрического поля позволило обнаружить дефект размером 0,3 мм на глубине залегания около 30 мм.

2. Для сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубкам парогенераторов РУ ВВЭР-1000 построены амплитудные спектры разности электрических потенциалов, а также модули спектральной функции и функции свертки. Показано, что функция свертки, имеет максимальное значение в той области сварного соединения, где присутствует структурная неоднородность.

3. Показано, что при испытаниях на растяжение цилиндрического образца из стали 12Х18Н10Т, сваренного из двух половинок с помощью лазерной сварки волоконным лазе-

ром, в интервале напряжений от 200 до 700 МПа на структурных уровнях, начиная с третьего и до пятого включительно, на разных половинах образца значения разности потенциалов отличаются не только по величине, но и по знаку, причем граница скачкообразного изменения знака потенциалов совпадает с осью сварного соединения.

4. При зонной локации поверхности цилиндрического образца из аустенитной стали 12Х18Н10Т в условиях растяжения на нагрузочной машине LM-29 при напряжениях 300-700 МПа на высоком структурном уровне, со стороны места прикладываемой нагрузки, наблюдалось появление небольших разрозненных участков размерами нескольких десятых миллиметров с относительно высокими значением амплитуды сигнала (начало процесса ~8 мкВ), которые с увеличением нагрузки увеличивались в размерах и распространялись в направлении от места приложения нагрузки к противоположному захвату машины, что связано с динамическими процессами образования фазы α'-мартенсита, наличие которой было установлено на основе анализа спектров дифракции тепловых нейтронов.

5. При испытаниях на растяжение образца из Д16Т на линейно-временных и поверхностных потенциограммах обнаружен зародыш трещины, местоположение которого в пределах погрешности одного-двух миллиметров геометрически совпало с сечением разрушения образца. Пятно в виде неправильного шестиугольника, размерами десятой доли миллиметра, на потенциограммах наблюдалось в разные периоды времени, при различных нагрузках, что подтверждает циклический характер формирования и роста зародыша, сопровождающегося излучением волн механических напряжений, характеристики которых были определены методом спектрального анализа.

6. При испытаниях на растяжение образца аустенитной стали 12Х18Н10Т в интервале напряжений 600-650 МПа методом СКП обнаружено резкое снижение детерминированной компоненты сигнала (тренда) в результате локализации пластической деформации и образования шейки в сечении сужения образца.

Практическая значимость работы

1. Получен первый опыт использования ЭФК на предприятиях Росатома – выполнен контроль сварных соединений приварки коллектора первого контура к корпусу парогенераторов ПГВ 1000М РУ ВВЭР-1000 с номерами № 18 и № 52 на площадке АО «АЭМ-Технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске.

2. Разработана методика выполнения ручного поточечного и автоматизированного электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубкам Ду1200 парогенераторов РУ ВВЭР-1000 с зоной контроля, соответствующей внешней цилиндрической поверхности сварного соединения с размерами 70 мм × 3770 мм.

3. Разработаны датчик ручного контроля сварных соединений с коническим преобразователем, имеющий угол конуса при вершине, близкий к 90 градусам и радиус скругления вершины примерно 0,3 мм. Преобразователи изготавливаются из стали Х18Н10Т (ГОСТ 14955-77) и имеют шероховатость поверхности чувствительного элемента R_a не менее 0,1-0,15 мкм.

4. Разработан механический сканер поверхности стационарного базирования *Elph*-200/2, имеющий выносной рычаг-измеритель длиной 200 мм с установленным на нем преобразователем, и привод от шагового двигателя, управляемого с помощью электронного блока.

5. Разработан электрофизический дефектоскоп сварных соединений ЭДСС – 1РД, предназначенный для проводного контроля технического состояния сварных соединений в режимах работы с внешним цифровым или аналоговым измерителем выхода на основе дифференциального метода измерения двухполярного постоянного напряжения.

6. Разработан прибор ЭФК *Spectroelph-FRR* для механического сканирования поверхности, со скоростью скольжения преобразователя по поверхности от 0,2 до 2,2 мм/с, для работы с нагрузочной машиной LM-29, управляемый дистанционно при помощи компьютера.

7. Разработаны обеспечивающие компьютерные программы для построения потенциограмм, анализа спектров сигналов на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и метода частотно-временного представления:

- Программа для амплитудной дискриминации сигналов контроля;
- Программы для спектрального анализа сигналов и частотно-временного представления.

Сравнение результатов ДПФ с окнами Ханна и Хемминга для сварных соединений, имеющих структурные нарушения и без них, показывает существенные отличия.

8. Полученные массивы экспериментальных данных разности электрических потенциалов для сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубкам парогенераторов, предназначены для использования их в качестве библиотек справочных данных.

Часть вопросов, рассмотренных в диссертации, относится к потенциометрии структурных нарушений при физико-механических испытаниях материалов. Впервые проведены совместные исследования процессов разрушения стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16Т на нагрузочной машине LM-29 методами дифракции тепловых нейтронов и сканирующей контактной потенциометрии на реакторе ИБР-2 в ЛНФ им. И.М. Франка в ОИЯИ г. Дубна.

Внедрение результатов диссертации

- В процессе пуско-наладочных работ трубопровода сжатого воздуха в инженерном корпусе Московской печатной фабрики – филиала АО «Гознак» были внедрены измерительная методика, устройство электрофизической диагностики стационарное и электрофизический дефектоскоп ЭДСС-1РД, а также мобильная информационно-измерительная система для оценки качества сварных соединений. Акт о внедрении №2-04/350 от 20.06.2016 г.
- На предприятии ООО «Химтех-Р» в условиях действующего производства прошли апробацию и внедрены методика электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений, разработанные измерительные средства сканирующей контактной потенциометрии и программное обеспечение для представления и обработки результатов измерений. Акт о внедрении № 29 от 22.06.2018 г.
- На основании договора между АО «АЭМ-технологии» (Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске») и НИЯУ МИФИ университет в период с 16.10.2017 г. по 19.10.2017 г. выполнил научно- исследовательскую работу по теме:

«Электрофизический неразрушающий контроль сварных швов парогенератора ПГВ 1000 М в ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске» по этапу «Апробация электрофизического метода неразрушающего контроля в условиях предприятия». Акт б/н о выполнении научно-исследовательской работы от 19.12.2017 г.

Положения, выносимые на защиту

- Результаты ЭФК сварных соединений приварки коллектора первого контура к корпусу парогенераторов ПГВ 1000М, находящихся в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке АО «АЭМ-Технологии» «Атоммаш».
- Методика выполнения ЭФК и метрологическое обеспечение измерений, выполняемых при контроле состояния металла сварного соединения.
- Измерительные средства, разработанные приборы и устройства для ЭФК технологического оборудования АЭС.
- Разработанные компьютерные программы для отображения результатов контроля, а также анализа спектров сигналов на основе дискретного преобразования Фурье и метода частотно-временного представления.
- Результаты исследования процессов разрушения стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16Т на нагрузочной машине LM-29 методами сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов на реакторе ИБР-2 в ЛНФ им. И.М. Франка в ОИЯИ г. Дубна.
- Результаты верификации разработанного метода и средств неразрушающего контроля.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях: 15-ая Международная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2015)» (Москва, 2015); III Международная заочная научно-практическая конференция «Автоматизированное проектирование в машиностроении: материалы» (Новокузнецк, 2015); XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученных по фундаментальным наукам «Ломоносов–2017» (Москва, 2017); XIII International Youth Scientific and Practical Conference «FUTURE OF ATOMIC ENERGY - AtomFuture 2017» (Москва,2017); 17-ая международная научно-практическая конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2017)» (Москва, 2017); 15th International School-Conference «New materials – Materials of innovative energy» (Москва,2017); XXI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (Санкт-Петербург, 2018);VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ, Москва, 2018); XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых, ученных по фундаментальным наукам «Ломоносов» (Москва, 2016); XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2018); XIII Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» (ВИТИ НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск, 2017); Международная молодежная конференция«XLII Гагаринские чтения» (МАИ, Москва, 2016); МНТК-2018, 11-я международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффектив-

ность и экономика атомной энергетики» (Москва, 2018); III Международная конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Инновационные ядерные реакторы малой и сверхмалой мощности» (г. Обнинск, 2018); Всероссийская конференция «молодых ученых–механиков» (г. Сочи, 2018).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 30 печатных работ, отражающих основное содержание диссертации, из них 7 статей в изданиях, входящих в базы цитирования ВАК, Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и пяти приложений. Объем работы 182 с., рисунков – 90, таблиц – 23, список литературы содержит 72 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе приведен перечень требований, предъявляемых к методам неразрушающего контроля технологического оборудования атомных станций, сформулированных в «Правилах контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций», утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [1] и в Правилах и нормах в энергетике (ПНАЭ-7-010-89). Выполнена оценка экономических перспектив внедрения разработанного метода на промышленных предприятиях.

Во второй главе представлена задача электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений узла приварки коллектора парогенератора ПГВ 1000 М, выполненного из стали 10ГН2МФА. Рассматриваются основные проблемы, возникающие при эксплуатации указанного парогенератора, связанные со сварным соединением приварки узла коллектора первого контура к корпусу парогенератора, а также методика выполнения электрофизического контроля и метрологическое обеспечение выполняемых измерений.

Программа контроля разработана и использована для ЭФК сварного соединения (СС) узла приварки коллектора парогенератора ПГВ 1000 М. В нее включены описание проблем, возникающих при эксплуатации парогенератора ПГВ 1000 М, постановка задачи ЭФК СС узла приварки коллектора, методика и правила выполнения ЭФК, а также метрологическое обеспечение измерений, выполняемых при контроле состояния металла.

Объектом ЭФК в настоящей работе является узел приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора, а зоной контроля – сварное соединение этого узла.

Главная причина повреждения коллекторов связана с образованием трещин различной протяженности. Такие трещины могут развиваться в течение нескольких лет [2].

Для выяснения причин повреждений коллекторов в зоне шва № 111 авторы работы [3] проводили комплекс исследований, включавший детальные расчетные исследования напряженного состояния от эксплуатационных факторов, расчетно-экспериментальное определение источников повышенной термомеханической нагруженности узла приварки горячего коллектора и другие вопросы.

Целью ЭФК СС № 111 парогенераторов ПГВ 1000 М в настоящей работе являлось:

- выявление и фиксация несплошностей (трещин, отслоений, прожогов, свищей, наплывов, усадочных раковин, подрезов, брызг металла, непроваров, скоплений и неодиночных включений и др.).
- оценка соответствия состояния металла установленным требованиям.

• обоснование возможного использования метода ЭФК на стадии технологической сборки коллектора и контроля операции выполнения СС в заводских условиях, а также определения перспективы использования метода в условиях эксплуатации парогенератора.

В работе решены следующие задачи:

• разработана программу ЭФК СС узла приварки Ду1200 коллектора парогенератора.

• разработаны и изготовлены адаптированные автоматизированные средства контроля с автоматической фиксацией результатов ЭФК СС в зоне узла приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора с шириной шва 60...70 мм и длиной около 3770 мм.

• разработана система сбора и обработки информации непосредственно в условиях действующего промышленного производства.

• произведен ЭФК СС методом сканирующей контактной потенциометрии в условиях действующего промышленного производства с применением локального теплового подогрева (при температурах 60...90°С), а также пропускания постоянного электрического тока (силой тока до 0,6 А, напряжением 3,6 В) через фиксированные диаметрально-противоположные токоподводы, расположенные на оси СС.

• обработаны результаты и выдано заключение о состоянии металла СС парогенераторов ПГВ 1000 М.

Неразрушающий контроль производился методом СКП (глава 3, работа [4]). Для оценки качества металла использовались значения контролируемого параметра, содержащиеся в работах [4-6].

Перед проведением ЭФК был произведен визуальный контроль поверхности СС, после которого на поверхности СС была нанесена разметка для измерений.

Неподвижный электрофизический преобразователь размещался на подготовленном участке внешней поверхности объекта. В некоторых случаях неподвижный преобразователь устанавливался на стапеле парогенератора на значительном удалении от зоны контроля.

После выдержки и работы измерительной системы в режиме *фона*, производилось механическое сканирование СС подвижным датчиком. Сканирование происходило путем последовательного устойчивого установления подвижного датчика в зоне контроля СС. В каждой точке с помощью мобильной диагностической системы производился автоматический набор данных в течение нескольких секунд. Дискретизация измерений была равна 1 измерение/с. После измерений по всей длине окружности СС вдоль одной дорожки подвижный датчик перемещался на другую измерительную дорожку, и процедура сканирования повторялась. Контроль выполнялся по восьми измерительным дорожкам, расстояние между которыми составляло ~ 9 мм (ширина шва примерно 70 мм, 70мм/8≈9мм).

Выявленные осмотром внешние дефекты СС диагностировались отдельно в процессе сканирования. Заархивированные файлы использовались для последующей обработки на ПК.

Метрологическое подтверждение пригодности разработанных средств измерений содержит оценку их соответствия и поверки. На всех этапах проведения экспериментальных работ периодически (с интервалом один раз в полгода) выполнялась самоповерка измерительных средств и информационно-измерительной системы в целом.

Поверяемые приборы были подготовлены к работе в соответствии с технической документацией на приборы *Agilent* 34401A Multimeter Data Sheet (https:\\manualslib.com).

В соответствии с технической документацией приборы *Agilent* 34401A в режиме измерений постоянного напряжения обладают базовым классом точности 0,0015. Базовый класс точности определяется пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность, значения которых ус-

тановлены в стандартах на средства измерений. Разрешение прибора соответствует 6,5 разрядов. Рабочая полоса частот 3 Гц - 300 кГц, скорость измерений составляет до 1000 считываний/с. Приборы комплектуются программным обеспечением *IntuiLink* и имеют интерфейсы USB 2.0, GPIB, LAN.

При поверке приборов измерения неизвестного напряжения выполнялись последовательно двумя приборами *Agilent* 34401A с заводскими номерами MY 45040724 и MY 45040792. Поверка проводилась по замерам выходного напряжения нормального элемента, по удельному электрическому сопротивлению прутков из латуни и проволоки из меди, а также по температуре закипания воды с использованием термопар (ГОСТ 1790-77. Проволока из сплавов хромель т, алюмель, копель, и константан для термоэлектродов термоэлектрических преобразователей. Технические условия).

По результатам поверки сделано заключение, что использованные средства измерений полностью соответствуют требованиям ГОСТ 8.497-83. Основная погрешность мультиметров *Agilent* 34401A с заводскими номерами MY 45040724 и MY 45040792 на рабочих пределах измерений соответствует значению 0,006%.

В третьей главе рассматривается особенности метода сканирующей контактной потенциометрии, разработанные средства электрофизического неразрушающего контроля, датчики и электрофизические сканеры поверхности, расчетно-экспериментальное моделирование остаточных напряжений в сварных соединениях, а также разработанные обеспечивающие компьютерные программы.

Основными преимуществами метода СКП перед методами, регламентируемыми Правилами, являются:

– высокая чувствительность обнаружения структурных неоднородностей в условиях эксплуатации изделий. В отличии, например, от метода акустической эмиссии, ограниченное применение, связанное с трудностью выделения малых сигналов на фоне помех, практически отсутствует для метода СКП. Шумы эффективно выделяются введением в измерительный тракт программируемых фильтров ПАД и вейвлет-фильтров, используемых на стадии обработки экспериментальных данных;

– обнаружение и регистрация как развивающихся, так и устойчивых (нерастущих) дефектов. Регистрация устойчивых неоднородностей позволяет классифицировать дефекты по размерам (или по другим косвенным признакам – форме, положению, ориентации). Регистрация развивающихся дефектов дает возможность их оценки по степени опасности (влияние на прочность и целостность объекта контроля). Рост дефекта, особенно в условиях, когда его размеры приближаются к критическому значению, сопровождается усилением интенсивности волн механических напряжений, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого дефекта электрофизическим преобразователем;

– низкое влияние высокочастотных электромагнитных шумов и наводок вследствие применения эффективных средств защиты. Применение дифференциальной схемы с разнесенными преобразователями, а также использование программируемых фильтров позволяет, практически, полностью избавиться от указанного недостатка;

– высокая степень адаптируемости к заданным (эксплуатационным) условиям, что отвечает требованиям функциональной диагностики. Линейные размеры электрофизических преобразователей могут быть достаточно малыми, менее одного миллиметра в диаметре, поэтому требуется незначительный физический объем для их размещения. Они обладают малой массой, имеют высокую помехоустойчивость, а также низкий уровень собственных шумов. В конструкциях датчиков отсутствуют сильноточные цепи и нагреваемые области, поэтому измерительные системы характеризуются высокой пожаробезопасностью. Также следует отметить низкий по мощности уровень полезного сигнала и отсутствие, в связи с этим, искрения в механических контактах измерительной цепи. Благодаря контактному взаимодействию преобразователя с контролируемой поверхностью появляется возмож-

ность получать информацию об изменении рельефа поверхности на основе анализа регистрируемого электрического сигнала. Применяемые датчики независимы от источников проводного электропитания;

– собирательная способность (интегральность) метода. Используя один или несколько датчиков, установленных неподвижно на поверхности объекта, можно проконтролировать весь объект целиком, что особенно важно при исследовании в труднодоступных местах или недоступных для контроля другими методами;

– высокая производительность, равная, а иногда превосходящая производительность методов неразрушающего контроля, регламентируемых Правилами. Этот показатель достигается применением современных достижений IT-технологий, эксклюзивными программными продуктами обработки и представления результатов, а также оригинальными конструкторскими решениями;

– дистанционность метода. Возможность проведения контроля при значительном удалении оператора от исследуемого объекта. Передатчик мобильной системы контроля передает сигнал на приемник с использованием одного из следующих форматов GSM, LTE, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *ZigBee*. Использование СКП для ответственных крупногабаритных конструкций, протяженных, особо опасных объектов позволяет выполнять контроль без вывода этих объектов из эксплуатации;

– безопасность и высокое соотношение «качество-цена». При указанных выше характеристиках метода СКП стоимость измерительных средств, примерно, в два-три раза ниже, чем для методов УЗК и акустической эмиссии, не говоря уже о радиографическом методе контроля.

В качестве первичных измерительных преобразователей используются измерительные контакты, изготовляемые из различных металлов или сплавов. В зоне образующегося контакта протекают процессы хемосорбции, металлической и биметаллической адгезии, а также когезивного взаимодействия металлов [7].

Взаимодействие электрофизического преобразователя с поверхностью описывается статистическими законами. Как известно, в зависимости от шероховатости поверхностей и приложенной нагрузки размер пятен реального контакта составляет от 0,1 до 10-40 мкм. На этих пятнах возникают давления, достигающие 10-20% от теоретической прочности материала. С увеличением нагрузки рост площади реального контакта происходит в основном за счет увеличения числа пятен при незначительном возрастании их размеров.

Площадь реального контакта составляет от 10^{-4} до 10^{-1} номинальной площади касания и даже при больших нагрузках не превышает 40%. Для пары металлов с различной твердостью площадь фактического контакта определяется свойствами более мягкого металла и геометрией поверхности твердого [8].

При контроле СС использовали конические преобразователи из меди и стали 12Х18Н10Т с углом конуса, близким к 90 градусам и радиусом скругления вершины, равным примерно 0,3 мм (Рисунок 1, а). Шероховатость поверхности (R_a) чувствительного элемента измерялась портативным цифровым профилометром фирмы *Vogel*. Применялись также датчики, специально разработанные для труб большого и среднего диаметров.

Электрофизический дефектоскоп ЭДСС-1РД

Электрофизический дефектоскоп сварных соединений ЭДСС – 1РД (далее дефектоскоп) предназначен для проводного контроля технического состояния сварных соединений (Рисунок 1, б). В дефектоскопе предусмотрены режимы работы с внешним цифровым или аналоговым измерителем выхода.

Рабочие условия применения дефектоскопа:

– температура окружающего воздуха – от +10°С до +35°С;

– относительная влажность – 80% при температуре 25°С.

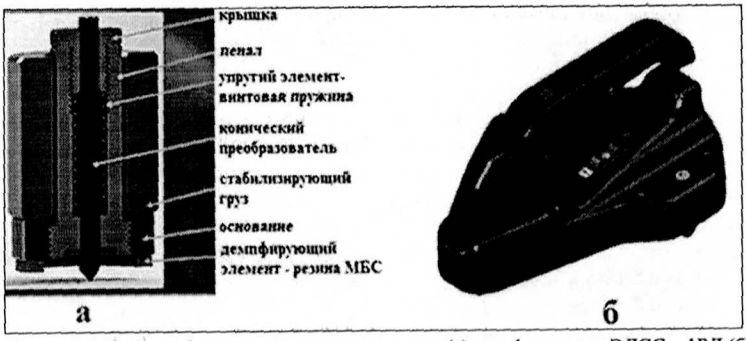

Рисунок 1. Электрофизический датчик в разрезе (а) и дефектоскоп ЭДСС – 1РД (б)

При работе дефектоскопа совместно функционируют встроенные переключатель измерительных сигналов и электрофизические преобразователи (в количестве трех).

Предел измерения напряжения постоянного тока выбирается автоматически или задается в зависимости от используемого цифрового или аналогового измерителя выхода и ограничивается значением 10 В. Основная погрешность измерения определяется в зависимости от используемого цифрового или аналогового измерителя выхода. Выходное сопротивление дефектоскопа не превышает 2 Ом. Срок непрерывной работы дефектоскопа не ограничен во времени. Для подсветки сварных соединений в условиях слабой освещенности используется лазерный указатель. Срок непрерывной работы встроенного лазерного указателя составляет примерно 20 часов. Время установления режима работы зависит от выбора внешнего измерителя выхода. Для цифровых измерителей время выхода на режим составляет 30 … 40 минут. Сопротивление изоляции между корпусом и электрической цепью по постоянному току составляет не менее 10^8 Ом. Габаритные размеры в трех измерениях не превышают 160x246x134 мм, масса прибора равна 800 г.

Электрофизические сканеры поверхности

Для ЭФК материалов и изделий были разработаны приборы настольного размещения для спектрального анализа сигналов: *Elph*-200/2 и *Spectroelph-FRR*. Приборы предназначены для применения при работе с разрывными испытательными машинами, обеспечивающими горизонтальное закрепление и нагружение образцов.

Прибор *Spectroelph-FRR* предназначен для совместной работы с разрывной машиной LM-29, размещенной в физзале реактора ИБР-2 в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубна (таблица). Приборы *Spectroelph-FRR* и *Elph*-200/2 применяются в целях исследования деформационной активности поверхности металлов и сплавов при механических испытаниях.

При испытаниях материалов сканирующий преобразователь скользит поступательно в горизонтальном направлении вдоль поверхности образца. Для этого используются винтовые механизмы и механический привод от шагового двигателя.

В приборе *Spectroelph-FRR* каретка с датчиком перемещается поступательно по двум цилиндрическим направляющим. По три опоры вращения используются с каждой стороны винтового механизма и направляющих. Измерительная штанга телескопического типа с игольчатым преобразователем установлена на консоли и поджимается к поверхности образца с помощью груза, закрепленного на винтовой пружине. Внешний вид информационно-измерительной системы с прибором показан на рисунке 2.

Измерения выполнены на программно-аппаратном комплексе «*ElphysLAB*-ИДС» мобильной информационно-диагностической системы, размещенной на ноутбуке Asus X554L. Для проведения измерений в режиме ручного детектирования был разработан про-

граммируемый амплитудный дискриминатор (ПАД) измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 50 дБ. Назначение дискриминатора заключается в отсечке тех значений амплитуды сигнала, которые выше установленного уровня, что позволяет исследовать распределение электрического потенциала на поверхности изделия в разных масштабах. Узкополосный фильтр позволяет настраивать ПАД по амплитуде, начиная с уровня десятых микровольт, с шагом 0,1 мкВ, широкополосный – от единиц и до десятков милливольт. Измерительная система управляется OS *Windows*, частота дискретизации измерений составляет 1 Гц.

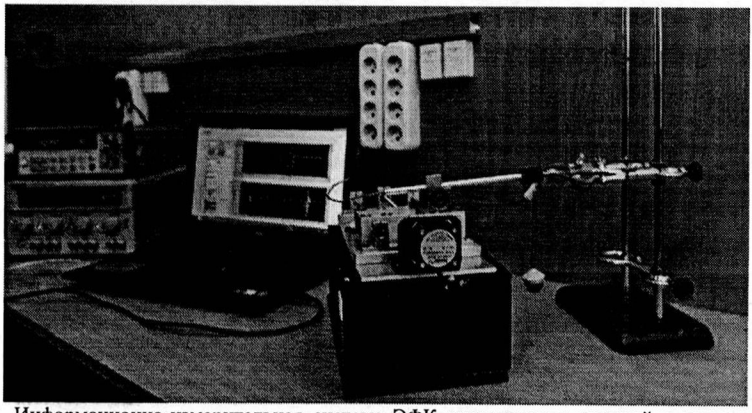

Рисунок 2. Информационно-измерительная система ЭФК материалов и изделий в комплекте с прибором *Spectroelph-FRR* (на переднем плане)

Таблица. Технические характеристики прибора *Spectroelph-FRR*

Материал преобразователя игольчатого типа (Ø2..3 мм)	Инструментальная нелегированная сталь У7-У10 (ГОСТ 1435-99)
Длина измерительной штанги, мм	30
Регулируемая скорость скольжения преобразователя по поверхности образца, мм/с	0,2-2,2
Чувствительность преобразователя, мкВ	0,01

В соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1] разработаны компьютерные программы для обработки диагностических сигналов и представления результатов ЭФК. Разработанные программы входят в программный комплекс обеспечения сбора и анализа результатов ЭФК. Полный пакет рабочих программ устанавливается на мобильной информационно-диагностической системе и работает совместно с измерительными устройствами и дефектоскопом.

Для выполнения операций фильтрации, интегрирования, вычисления спектра, построения гистограмм и др. использовались как стандартные компьютерные программы, так и специально разработанные в среде *MathCAD*.

Анализ сигналов на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ)

Необходимая частота дискретизации, при которой не происходит потери информации (частота Найквиста), как известно, определяется теоремой Котельникова, согласно которой частота отсчетов должна быть равна не менее удвоенной верхней частоте спектра изучаемого процесса. Если целью является построение временной функции сигнала, то рекомен-

дуется, чтобы частота дискретизации примерно в 10 раз превышала максимальную частоту сигнала. Если анализ проводят в частотной области, то для реализации процедуры преобразования Фурье необходимо, чтобы частота дискретизации была в два раза выше максимальной частоты сигнала, как принято в настоящей работе.

Дискретное преобразование Фурье позволяет выполнять переход от дискретного сигнала к дискретному спектру и наоборот и обладает хорошей частотной локализацией. Рассмотрим электрический сигнал на выходе преобразователя как функцию времени $\Delta\varphi(t)$ конечной длительности ($0<t<T_к$). Измерения в течение времени $T_к$ производятся через равные временные интервалы $\Delta t = T_к/n$. Дискретное N - точечное преобразование Фурье для функции $\Delta\varphi(t)$ запишем в виде:

$$\Phi_n = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} \Delta\varphi_k\, e^{-(2\pi nk/N}.$$

Функция Φ_n представляет собой частотный выход ДПФ в k-той точке спектра, где значение k находится в интервале от 0 до N–1. Число N равно числу отсчетов. В этой записи функция времени $\Delta\varphi(t)$ уже дискретизирована и представляет собой n-й отсчет (значение) во времени $\Delta\varphi_n$, где n также как и k изменяется от 0 до N–1. Но в силу симметричности результата ДПФ достаточно, чтобы n изменялось от 0 до $N/2$–1.

Спектр Φ_n является результатом вычисления свертки между выборкой, состоящей из входных отсчетов во временной области изменения $\Delta\varphi_n$, и набором из N пар гармонических базисных функций синусов и косинусов. При анализе экспериментальных данных использовали также модуль функции спектра.

Для уменьшения искажений спектра, связанных с конечностью экспериментальной выборки, применяли окна (весовые функции) Ханна и Хэмминга.

Для области контроля парогенераторов рассчитаны функции свертки Z_k^i [9]:

$$Z_k^i = \sum_{n=0}^{\frac{M}{2}-1}\left(\left|\Phi_n^i\right|\left|\Phi_n^j\right| \cdot e^{(2\pi nk/M}\right).$$

где число M изменялось в пределах от одной до нескольких тысяч, n – в пределах от нуля до ($M/2$-1). Верхние индексы i и j у модулей функции спектра обозначают номер измерительной дорожки.

Анализ сигналов на основе функции удельной электрической мощности

Функцию удельной электрической мощности применяли для анализа результатов физико-механических испытаниях материалов на растяжение. Для этого экспериментальная кривая разбивалась на временные интервалы, соответствующие заданному значению механической нагрузки. При обработке сигналов использовали интегральную характеристику:

$$E_{mech} = \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi(t))^2 dt,$$

с помощью которой рассчитывали функцию удельной электрической мощности w:

$$w = \frac{E_{mech}}{\Delta t} = \frac{\int_{t_1}^{t_2}(\Delta\varphi(t))^2 dt}{\Delta t},$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$. Функцию E_{mech} использовали также для расчета нормальных контактных напряжений.

Частотно-временной анализ

В работе применялись методы частотно-временного анализа сигналов ЭФК [10]. Предполагается наличие частотно-временной зависимости между происходящими в материалах процессами и регистрируемыми сигналами. Под нагрузкой в твердом теле протекают структурные изменения, сопровождающиеся излучением волн механических напряжений в широком диапазоне частот. Образование волн механических напряжений приво-

дит к изменению профиля поверхности или, более конкретно, волнистости и шероховатости поверхности. Разработанная методика измерений позволяет регистрировать изменение контактной разности потенциалов на поверхности металлов и сплавов, которая потом исследуется методами частотного и частотно-временного анализа.

Для изучения спектра волн механических напряжений, излучаемых структурным дефектом, использовали метод частотно-временного анализа и разработанные на его основе компьютерные программы.

Спектрограмма $P_S f(u,v) = |Sf(u,v)|^2$ дает значение энергии сигнала f в частотно-временной окрестности точки (u,v). Для исследования хребтов спектрограммы необходимо вычислить мгновенные частоты по локальным максимумам $P_S f(u,v)$. Преобразование Фурье с окном вычисляли с помощью симметричного окна $g(t) = g(-t)$ в интервале $[t_1,t_2]$:

$$Sf(u,v) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)\, g_S(t-u) e^{-ivt} dt.$$

В качестве оконной функции использовали функцию Гаусса вида $exp\left[-\alpha\left(\frac{i-Mw}{Mw}\right)^2\right]$, где α – постоянная, Mw – ширина частотного окна.

В четвертой главе приведены результаты ЭФК СС узла приварки коллектора указанных парогенераторов. Выполнен визуальный контроль входных и выходных коллекторов парогенераторов и выявлены дефекты типа мелких неглубоких царапин, мелких вмятин и коррозионных пятен, образовавшихся в результате длительного хранения изделий.

Построены потенциограммы для входных и выходных коллекторов ПГ-18 и ПГ-52. Результаты зонной локации ЭФК СС приварки холодного коллектора первого контура к корпусу ПГ-52 показано на рисунке 3. Обращает внимание множество поверхностных дефектов, сконцентрированных вдоль оси СС. Заметная неоднородность распределения потенциалов на поверхности связана с многочисленными царапинами и глубокими вкраплениями мелких пятен ржавчины. На рисунке 4 приведена потенциограмма в режиме пропускания постоянного тока. На ней обнаружена сингулярность, расположенная в районе четвертой или пятой измерительных дорожек (выделена в круг и показана на рисунке стрелкой). Точность локации выявленной сингулярности оценивалась с помощью прибора УЗК-контроля *Ultrasonic flaw detector* A1214 Expert. Глубина ее залегания от поверхности СС составила примерно 30 мм.

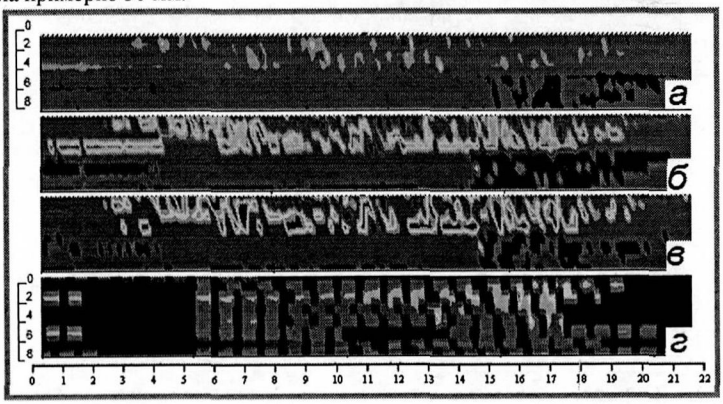

Рисунок 3. Поверхностная потенциограмма СС приварки выходного коллектора первого контура к корпусу ПГ-52, построенная для разных значений СУС: а – 4,77 мкВ; *б* – 5,046; *в* – 5,301; *г* – результаты поточечного сканирования, СУС= 4 мкВ.

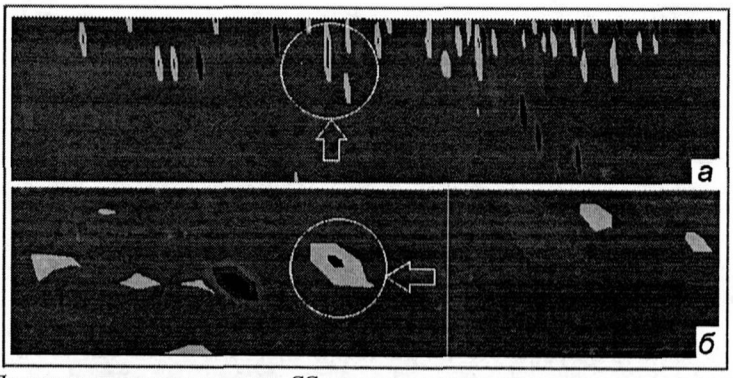

Рисунок 4. Поверхностная потенциограмма СС приварки холодного коллектора первого контура к корпусу ПГ-52: а – несовершенства, обнаруженные с помощью дефектоскопа ЭДСС-1РД; б – сингулярность, обнаруженная в области контроля

Анализ свертки для первой измерительной дорожки ПГ-52 (входной коллектор, рисунок 5) показывает некоторые отличия значений этой спектральной характеристики для различных дорожек. Наибольшие значения на рисунке наблюдаются для функции свертки с номерами 1 и 2, что соответствует дорожкам, расположенным близко к осевой линии СС с обнаруженной сингулярностью.

Рисунок 6 (слева) демонстрирует обнаруженную неоднородность в СС коллектора в условиях его локального подогрева, а на рисунке справа показана спектрограмма, полученная при одновременном подогреве и пропускании электрического тока. И в том, и другом случае на спектрограмме присутствует один максимум, соответствующий выявленному нарушению.

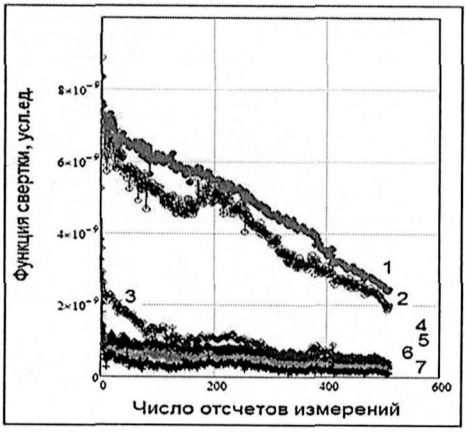

Рисунок 5. Зависимость функции свертки от числа отсчетов измерений, построенная для первой измерительной дорожки (ПГ-52, входной коллектор): 1 – свертка с функцией шестой дорожки; 2 – с функцией пятой дорожки; 3 – с функцией седьмой дорожки; 4 – с функцией третьей дорожки; 5 – с функцией второй дорожки; 6 – с функцией четвертой дорожки; 7 – с функцией восьмой дорожки.

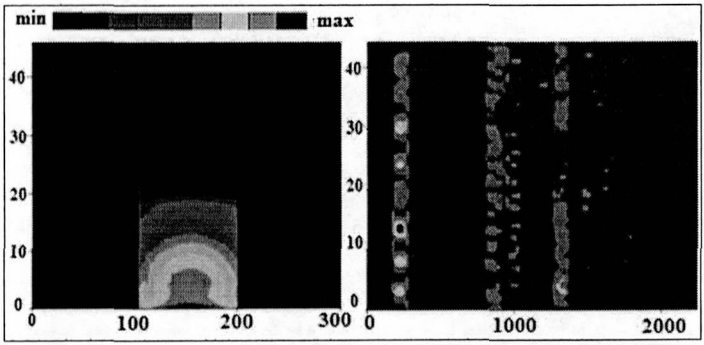

Рисунок 6. Спектрограмма, полученная при ЭФК СС приварки выходного коллектора первого контура к корпусу ПГ-18 с подогревом (слева) и с подогревом и пропусканием тока одновременно (справа). Измерения выполнены дефектоскопом *ЭДСС-1РД*

Полученные результаты демонстрируют разрешающую способность спектрального анализа для разных значений СУС: с увеличением СУС проявляется более четкая частотная локализация, что дает возможность обнаруживать нарушения СС путем сравнения текущего спектра со спектром бездефектного изделия (или эталона). Таким образом, детализация спектров частотного представления достигается как за счет изменения масштаба частоты, так и за счет увеличения значения СУС.

На основе проведенного анализа с учетом всех полученных результатов дано заключение о состоянии металла сварного соединения парогенераторов ПГВ 1000 М.

Зоной контроля являлась внешняя цилиндрическая поверхность СС узла приварки коллектора с размерами 70 мм × 3770 мм. Предварительный визуальный контроль поверхностей СС парогенераторов не обнаружил заметных отклонений от требований Правил, предъявляемых к качеству сварных соединений.

В верхней части СС приварки входного коллектора первого контура к корпусу ПГ-52 неравномерность распределения цветовых пятен на потенциограммах связана с имеющимися многочисленными царапинами и относительно глубокими вкраплениями точечной коррозии. На структурном уровне «4,155» заметны широкие поперечные полосы (красного цвета). На участке №15 в центральной части СС обнаружена небольшая вмятина протяженностью около 4 мм, которая на потенциограмме (СУС =5,301) отображается в виде обширного пятна темно-синего цвета. Выделяется небольшая группа дефектов малого размера (4-я и 5-я зоны, пятна красного цвета диаметром несколько миллиметров), которые идентифицируются как следы проникающей точечной коррозии.

Результаты зонной локации СС приварки выходного коллектора первого контура к корпусу ПГ-52 показывают большое количество поверхностных дефектов, расположенных вдоль оси СС. Сравнение потенциограмм входного и выходного коллектора ПГ-52, для одного и того же структурного уровня (СУС=5,301), показывает, что для выходного коллектора проникающая подповерхностная коррозия имеет более обширные и плотные очаги залегания. Данный вывод подтверждают результаты спектрального анализа: для центральных измерительных дорожек спектральная плотность сигнала имеет наибольшее значение. На участке №14-№15 на глубине залегания 30 мм обнаружена сингулярность в режиме пропускания электрического тока.

Обширные очаги проникающей коррозии обнаружены при зонной локации выходного коллектора ПГ-18, в виде поперечных полос (желтого цвета) на структурном уровне СУС=4. Отдельные подповерхностные дефекты обнаружены на двух первых измеритель-

ных дорожках (СУС= 4,721) в режиме одновременного нагрева и пропускания тока, а также в режиме нагрева (СУС =3,699).

По результатам проведенного анализа состояние металла сварного соединения узла приварки входного и выходного коллектора парогенератора ПГ-52 и выходного коллектора парогенератора ПГ-18 оценивается как удовлетворительное, показания лежат в допустимых пределах, значений, превышающих критический уровень, не обнаружено.

В четвертой главе приведены также результаты исследования нормальных контактных напряжений в сварных соединениях из ферритной стали 12ХН3А, стали 45 и низколегированной конструкционной стали 18MND5, выполненных различными видами сварки.

В пятой главе приведены результаты верификации разработанных экспериментальных и расчетных методик, а также средств измерений. В рамках выполнения диссертационного исследования были проведены эксперименты на исследовательском реакторе ИБР-2 в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в ОИЯИ г. Дубна. В процессе физико-механических испытаний аустенитной стали 12Х18Н10Т и сплава Д16Т на разрушение одновременно были использованы методы СКП и дифракции тепловых нейтронов. Для измерений применяли датчики с преобразователями из стали У10. Распределение потенциалов на поверхности было получено относительно потенциала «массы» разрывной машины.

Цилиндрические образцы из стали 12Х18Н10Т длиной 85 и диаметром 5 мм были изготовлены фрезерованием из проката с последующей полировкой рабочей поверхности до шероховатости R_a, изменяющейся в пределах 0,55...0,70 мкм.

Сканирование датчика по поверхности образца осуществляли автоматически с помощью прибора *Spectroelph-FRR* в процессе растяжения образца на нагрузочной машине LM-29 [11]. На каждой нагрузке образец выдерживался в течение двух часов, при этом производилось до двадцати измерительных сетов со скоростью сканирования 2,2 мм/с.

Расчеты для нормального контактного напряжения выполнены для временного интервала, соответствующего выбранному режиму испытаний.

Эксперименты по дифракции нейтронов проводились на нейтронном фурье-стресс-дифрактометре [12]. Образец № 1 (сталь 12Х18Н10Т) подвергался нагрузке в диапазоне напряжений от 100 до 700 МПа до образования видимой шейки. Образец № 2 (сталь 12Х18Н10Т со сварным швом) подвергался нагрузке в диапазоне от 100 до 700 МПа до полного разрушения образца. Образец №2 сначала был разрезан на две части, а потом сварен волоконным лазером в Лазерном центре НИЯУ МИФИ. В процессе увеличения нагрузки на потенциограмме наблюдали цветовую картину отображаемых рефлексов, вызванную влиянием внутренних механических напряжений и формированием динамической шероховатости. Особенно заметно это проявлялось при напряжениях, превышающих предел текучести. Для анализа результатов измерений использовали программно-расчетный комплекс «*ElphysLAB*-ИДС» мобильной информационно-диагностической системы.

При испытаниях на растяжение образца №2 в интервале напряжений от 200 до 700 МПа на структурных уровнях, начиная с третьего и до пятого включительно, на разных половинах образца значения разности потенциалов отличаются не только по величине, но и по знаку, причем граница скачкообразной инверсии знака совпадает с осью сварного соединения (Рисунок 7).

При зонной локации поверхности цилиндрического образца из аустенитной стали 12Х18Н10Т (№3) в условиях растяжения на нагрузочной машине LM-29 в интервале напряжений 300-700 МПа наблюдалось появление небольших разрозненных участков размерами нескольких десятых миллиметров с относительно высокими значением амплитуды сигнала (начало процесса ~8 мкВ). С увеличением нагрузки пятна увеличивались в размерах и распространялись в направлении от места приложения нагрузки к противоположному захвату машины (Рисунок 8), что связано с динамическими процессами образования

фазы α'-мартенсита, наличие которой было установлено по спектрам дифракции тепловых нейтронов.

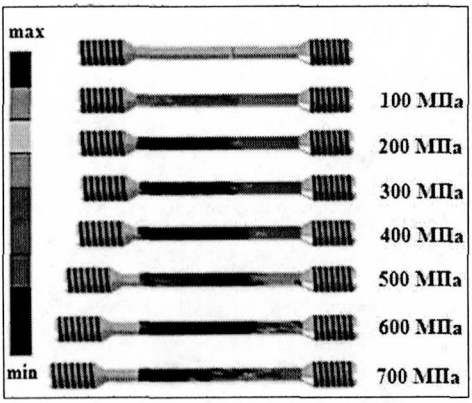

Рисунок 7. Макет образца № 2 из стали 12Х18Н10Т со сварным соединением и проекция потенциограмм на поверхность образца при напряжениях 100-700 МПа и значении СУС =5. Относительное удлинение образца при разрушении составило 0,34

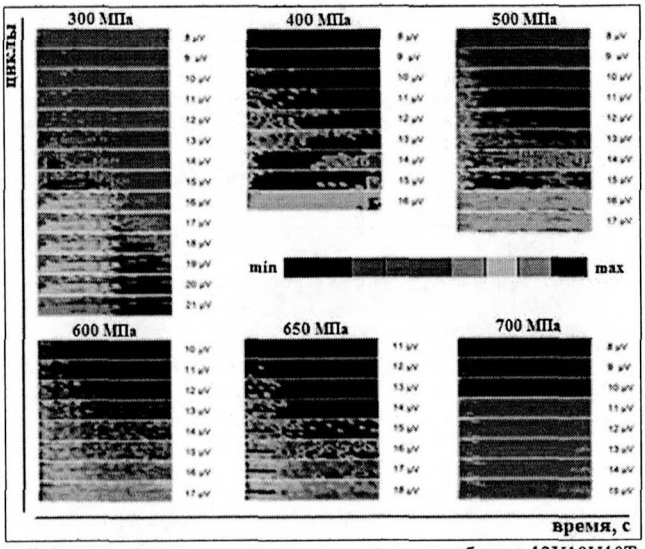

Рисунок 8. Линейно-временные потенциограммы поверхности образца 12Х18Н10Т (№ 3) при соответствующем значении нагрузки. С правой стороны рисунков приведены значения ПАД. Образец разрушился при нагрузке 700 МПа

На линейно-временных и поверхностных потенциограммах обнаружен зародыш трещины при испытаниях на растяжение образца из Д16Т на нагрузочной машине LM-29, местоположение которого в пределах погрешности одного-двух миллиметров геометрически совпало с сечением разрушения образца (Рисунок 9, а). Сравнивая эти результаты с ре-

зультатами, полученными на разрывной машине INSTRONE 5982 при испытаниях стали ЭИ847 на кафедре «Физики прочности» НИЯУ МИФИ [13], можно сделать вывод о регистрации зародыша микроскопической трещины в объеме образца, примерно на одном и том же значении СУС (Рисунок 9, б).

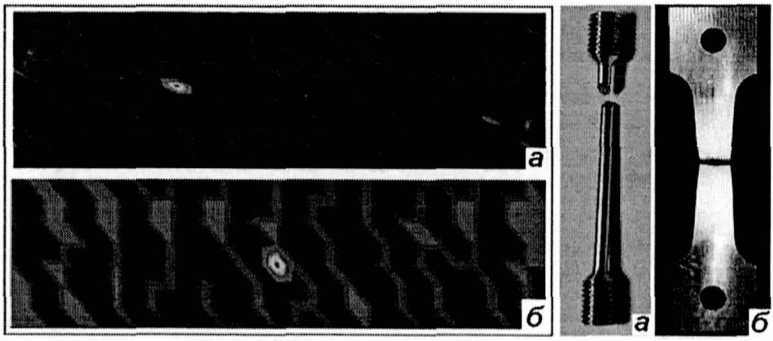

Рисунок 9. Потенциограммы, полученные при растяжении сплава Д16Т на нагрузочной машине LM-29 (σ = 400 МПа, СУС = 5) (а) и стали ЭИ847 на разрывной машине INSTRON-5982 (σ = 550 МПа, СУС =4,854) (б). В обоих случаях виден зародыш образующейся трещины

В целях верификации разработанного метода и средств ЭФК на предприятии ООО «Техноскан» (г. Волгодонск) проведено исследование специально приготовленного образца методами СКП и радиографического контроля. Образец из 12Х18Н10Т, размером 230×200×12 см, был сварен из двух половин ацетиленовой сваркой.

В соответствии с поставленной задачей при выполнении СС сварщиком были искусственно введены многочисленные дефекты: непровар корня, непровар по разделке, газовые поры, свищ и др. Также внутри СС был заварен небольшой кусочек вольфрамового стержня (КВС). После подготовки образца СС было просвечено на рентгеновской установке РАПАН М 200/100, зав.№103326. Результат представлен на пленке AGFA D7 (100×240), где на рисунках 10 и 11 стрелками выделен анализируемый участок СС.

После этого выполнен контроль данного образца ручным поточечным сканированием вдоль оси СС по восьми измерительным дорожкам и построены поточечно-временные потенциограммы (Рисунки 10 и 11) с применением ПАД. На рисунках площадь потенциограммы соответствует площади СС, выделенного на рентгеновской пленке стрелками.

На последнем этапе исследования проведен анализ потенциограмм методом непосредственного сравнения (наложения) цветовых рефлексов с дефектами, отображенными на пленке. Заключение о наблюдаемых дефектов на потенциограммах даны в соответствии с расшифровкой рентгенограмм специалистами ООО «Техноскан» и их комментариями.

На потенциограммах были выявлены все присутствующие (искусственно введенные) структурные нарушения: несплавление корня, непровар корня, непровар по разделке шва, скопление пор, отдельные поры, свищ, КВС и другие нарушения.

Цветовые рефлексы на потенциограммах от перечисленных дефектов наблюдаются в определенных диапазонах СУС и имеют различную форму и размеры. Например, линия несплавленного корня идентифицирована на СУС=2,699. На потенциограмме данный дефект представляет собой относительно протяженную широкую полосу. Еще более отчетливо данный дефект проявляется на СУС=3,004. Несплавление по разделке шва (или непровар по разделке) также представляет собой широкую полосу на СУС=1.

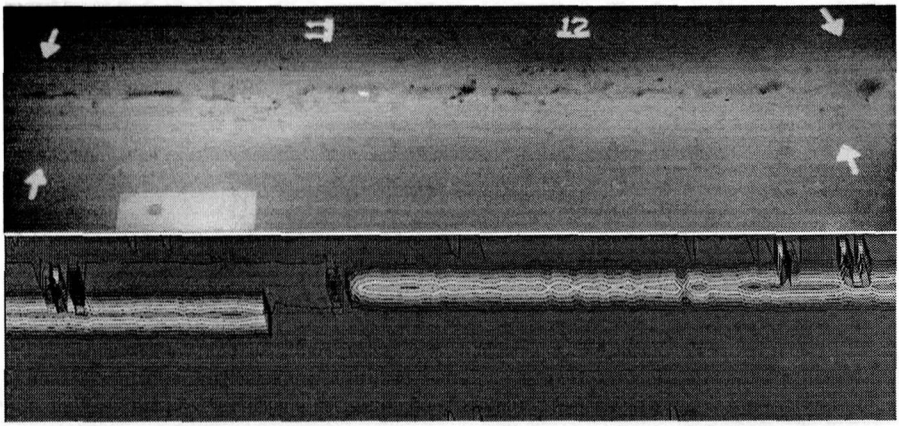

Рисунок 10. Рентгенограмма (вверху) и потенциограмма (внизу) третьего уровня (СУС=3,004). На потенциограмме видны структурные нарушения вдоль оси СС: тонкая структура «непровара» и КВС. Видно также как микронапряжения, связанные с присутствием микропор, уменьшаются по величине от оси СС к его периферии

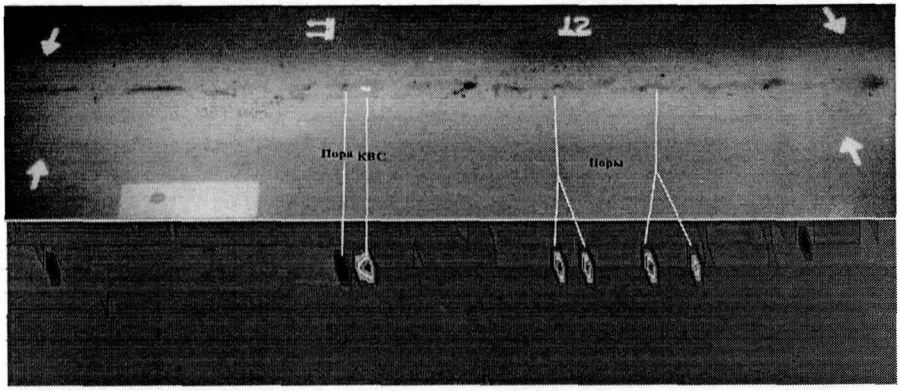

Рисунок 11. То же, что и на рис. 10 для СУС=3,229. Видны КВС и большая пора, расположенная слева от него, а также рефлексы от других отдельных пор, которые располагаются справа, по разделке шва (четыре крупных цветовых рефлекса)

На рефлексы от данных типов дефектов накладываются рефлексы от отдельных газовых пор и скоплений газовых пор, которые заметны уже на СУС ≥ 2,6. Такие дефекты, как свищ, КВС и крупные газовые поры хорошо видны на СУС=3,229. На потенциограмме они имеет форму неправильных многоугольников небольшого размера, вытянутых в направлении перпендикулярном оси СС. Одной из особенностей ЭФК является способность к масштабированию размера дефекта путем увеличения значения СУС с высокой степенью разрешения, которая в основном зависит от чувствительности измерительного прибора.

На СУС=4,301 наблюдается эффект наложения рефлексов от скопления мелких пор и непровара корня (широкая полоса посередине потенциограммы). Тонкая структура от

КВС, предположительно поле внутренних упругих напряжений вокруг дефекта, видна на СУС=5,699.

Сложная интерференционная картина наблюдается на потенциограммах на СУС≥5: появляются многочисленные рефлексы, связанные как с наличием мелких газовых пор, так и с непроваром корня.

Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля убедительно доказывает, что ЭФК является новым высокочувствительным и высокоинформативным методом неразрушающего контроля и может применяться как дополнительный метод НК сварных металлических соединений. С его помощью, на основе выработанных критериев и с использованием архива и библиотек лаборатории *ElphysLAB* НИЯУ МИФИ, были определены количество и координаты всех внесенных в СС дефектов с размерами менее одного миллиметра, зарегистрированных радиографическим методом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые, в условиях действующего предприятия «АЭМ-Технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске, на основе метода сканирующей контактной потенциометрии выполнен электрофизический неразрушающий контроль сварных соединений приварки коллектора первого контура к корпусу парогенераторов ПГВ 1000М РУ ВВЭР-1000 с номерами №18 и №52. Контроль выполнен по методике ручного поточечного и автоматизированного сканирования сварных соединений в зоне, соответствующей внешней цилиндрической поверхности сварного соединения с размерами 70 мм × 3770 мм.

2. Разработаны средства электрофизического неразрушающего контроля и компьютерные программы для представления и анализа результатов контроля.

3. Применен спектральный анализ электрических сигналов на основе дискретного преобразования Фурье с весовыми функциями Ханна и Хемминга. Для сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубкам парогенераторов РУ ВВЭР-1000 построены амплитудные спектры разности электрических потенциалов, а также функции спектральной плотности сигнала и функции свертки. Показано, что спектральная плотность сигнала, как и функция свертки, имеет максимальное значение в той области сварного соединения, где присутствует структурная неоднородность. По результатам проведенного анализа состояние металла сварного соединения узла приварки входного и выходного коллектора парогенератора ПГ-52 и выходного коллектора парогенератора ПГ-18 оценивается как удовлетворительное, показания лежат в допустимых пределах, значений, превышающих критический уровень, не обнаружено.

4. При зонной локации поверхности цилиндрического образца из аустенитной стали 12Х18Н10Т в условиях растяжения на нагрузочной машине LM-29 в интервале напряжений 300-700 МПа наблюдалось появление небольших разрозненных участков размерами нескольких десятых миллиметров с относительно высокими значениями амплитуды сигнала (начало процесса ~8 мкВ). С увеличением нагрузки пятна увеличивались в размерах и распространялись в направлении от места приложения нагрузки к противоположному захвату машины, что связано с динамическими процессами образования фазы α'-мартенсита, наличие которой было установлено по спектрам дифракции тепловых нейтронов. В интервале напряжений 600-650 МПа обнаружено резкое снижение детерминированной компоненты сигнала (тренда) в результате локализации пластической деформации и образования шейки в сечении сужения. Показано, что при испытаниях на растяжение образца из стали 12Х18Н10Т, сваренного из двух половин с помощью волоконного лазера в интервале напряжений от 200 до 700 МПа на структурных уровнях, начиная с третьего и до пятого включительно, на разных половинах образца значения разности потенциалов отличаются не только по величине, но

и по знаку. При этом граница скачкообразной инверсии знака разности потенциалов совпадает с осью сварного соединения.

5. Установлено, что использование метода амплитудной дискриминации сигналов на высоком структурном уровне позволяет в области квазиупругой деформации для стали ЭИ 847 при напряжении 300 МПа, с погрешностью равной 0,5 мм, выявить на всей длине образца тот участок, на котором при более высоких нагрузках образовалась шейка и произошло разрушение. Рассчитаны значения нормальных контактных напряжений в зоне сварного соединения в пластинах из стали 45 (лазерная сварка), стали 2ХН3А (электронно-лучевая сварка) и стали 18MND5 (электронно-лучевая сварка). Наибольшие значения нормальных контактных напряжений получены для сварного соединения пластин из стали 45, что связано с наибольшим значением модуля упругости и с наименьшей рассчитанной средней площадью микроконтакта.

6. Достоверность полученных результатов подтверждается их прямым сопоставлением с результатами радиографического контроля, выполненного в ООО «Техноскан» в г. Волгодонске, а также результатами верификации методами дифракции тепловых нейтронов на ИБР-2 в ЛНФ им. И.М. Франка в ОИЯИ г. Дубна, ультразвукового контроля на площадке АЭМ-технологии «Атоммаш» и методом корреляции изображений на кафедре физики прочности НИЯУ МИФИ. Внедрение методов и средств электрофизического неразрушающего контроля на основе метода сканирующей контактной потенциометрии на предприятиях атомной отрасли внесет существенный вклад в повышение уровня безопасной эксплуатации технологического оборудования АЭС.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций (НП-084-15)// Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. –Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2015 г., №502, М.:2016 г.

2. Разыграев А.Н., Разыграев Н.П., Диков И.А. Исследование и практика выявления трещин замедленного деформационного коррозионного растрескивания // Дефектоскопия, №4, 2017, с. 57-65.

3. Харченко С.А., Трунов Н.Б., Коротаев Н.Ф., Лякишев С.Л. Результаты работ по исследованию причин повреждения металла в районе сварного шва приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора и разработка компенсирующих мероприятий// Сборник трудов 8-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск, ОКБ "Гидропресс", 2010.

4. Сурин В.И., Евстюхин Н.А. Электрофизические методы неразрушающего контроля и исследования реакторных материалов. Учебное пособие. М: МИФИ, 167 с., 2008.

5. Диагностическое обследование трубопровода сжатого воздуха инженерного корпуса Московской печатной фабрики – филиала АО Гознак/ В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов, В.Д. Мотовилин, Н.В. Рейн// Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ, 2016, регистрационный номер АААА-А16-116120550081-4, 75 с.

6. Международная заявка, опубликованная в соответствии с договором о патентной кооперации (PCT). Название изобретения «Способ локального обнаружения дефектов и устройство для реализации такого способа (варианты)», изобретатель Сурин В.И. Номер международной публикации WO 2017/180007 A1.

7. Ferrante J., Smith J.R. Diatomic molecules, adhesion, cohesion, and chemisorption: a single binding-energy relation//Physical Review Letters. 1983. v.50. pp. 1385-1386.

8. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин.– М.: Машиностроение,1981.

9. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов.– М.: Связь, 1980.

10. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005.

11. Bokuchava G.D., Aksenov V.L., Balagurov A.M., Zhuravlev V.V., Kuzmin E.S., Bulkin A.P., Kudryashev V.A., Trounov V.A. Neutron Fourier diffractometer FSD for internal stress analysis: first results// Applied Physics A: materials Science and Processing, 2002, vol.74 [Suppl1], pp. 86-88.

12. Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kuzmin E.S., Tamonov A.V., Zhuk V.V. Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation// Zeitschrift kristallographie, Supplement Issue No.23, 2006, pp. 217-222.

13. Abu Ghazal A.A., Dzhumaev P. S., Osintsev A. V., Polskii V. I., Surin V.I. Physiomechanical materials testing using scanning contact potentiometry method// KnE Materials Science, 15th International School-Conference "New materials – Materials of innovative energy.– publishing@knowledgee.com , Dubai, UAE, 2017 («Knowlegde E»).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Abu Ghazal A.A., Dzhumaev P. S., Osintsev A. V., Polskii V. I., Surin V.I. Physiomechanical materials testing using scanning contact potentiometry method// KnE Materials Science, 15th International School-Conference "New materials – Materials of innovative energy.– publishing@knowledgee.com , Dubai, UAE, 2017 («Knowlegde E»).

2. Abu Ghazal A.A., Denisov R.A., Lisenkov A.V., Surin V.I. Method for evaluation of contact mechanical stress in gear mechanism//Modern problems of theory machines/ SEC "MS". – North Charleston, USA, 2016.–№ 4(1). p. 184-187.

3. Abu Ghazal A.A., Bokuchava G.D., Papushkin I.V., Surin V.I., and Shef E.A., "The Application of Scanning Contact Potentiometry Method and Diffraction of Thermal Neutrons at Physico-Mechanical Tests of Materials" in XIII International Youth Scientific and Practical Conference "FUTURE OF ATOMIC ENERGY - AtomFuture 2017", KnE Engineering. p. 109–126.

4. Абу Газал А.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В., Сурин В.И. Испытания аустенитной стали Х18Н10Т на разрушение с помощью сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов. – В сб.: Докл. XIII Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики - Atomfuture». Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2017, с.11-13.

5. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Шеф Е.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Разработка и применение прибора электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов. – В сб.: трудов XVII международная научно-практическая конференция «системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». Москва: ИПУ РАН, 2017, с. 220-223.

6. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Алвахсба А.И. Бекетов В.Г., Дембицкий А.Е., Гусев Д.А. Результаты применения электрофизического метода неразрушающего контроля в заводских условиях// VII Международная научная школа-конференция (Современные проблемы физики и технологии). Тезисы докладов, ч.2. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. с. 181-182.

7. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В., Исследование структурных превращений в сталях с помощью методов сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов. – В сб.: Докл. VII международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий». Сек. ядерная физика и технологии. Москва: НИЯУ МИФИ, 2018, с. 179-180.

8. Сурин В.И., Лисенков А.В., Абу Газал А.А., Соловьев Н.С. Разработка расчетной модели для определения упругих напряжений и деформаций в изделиях сложной формы//

XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученных по фундаментальным наукам «Ломоносов–2016». Секция «Физика». Сборник тезисов.– М. Физический факультет МГУ, 2016, с. 161-162.

9. Сурин В.И., Абу Газал А.А., Волошин Е.В., Тельнов Е.Ю., Титовец Д.О. Разработка средств и методов обработки сигналов электрофизической диагностики для физико-механических испытаний материалов// Информационные технологии в проектировании и производстве. – М.: ФГУП ВИМИ, 2017, № 4(166), с. 55-59.

10. Сурин В.И., Губина Т.В., Абу Газал А.А., Вебер А.Е. Спектральный анализ диагностических сигналов на основе интегральных преобразований// Информационные технологии в проектировании и производстве.– М.: ФГУП ВИМИ, 2016, № 2(162), с. 37-44.

11. Сурин В.И., Абу Газал А.А. ,Алвахеба А.И., Шеф Е.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Расчетно-экспериментальный метод моделирования остаточных напряжений в сварных соединениях. // Информационные технологии в проектировании и производстве.– М.: ФГУП ВИМИ, 2018, № 2, с. 48-55.

12. А.А. Абу Газал, В.И. Сурин, Г.Д. Бокучава, И.В. Папушкин, Исследование сварных соединений из стали 12Х18Н10Т методами сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов. В сб.: Докл. 18-ой Международной научно-практическая конференция «системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». Москва: ИПУ РАН, 2018, с. 55.

13. Сурин В.И., Абу Газал А.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В., Использование методов сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов для определения остаточных напряжений в ядерных и конструкционных материалах. – В сб.: Докл. V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК НИКИЭТ , 2018, с. 123.

14. Абу Газал А.А. , Сурин В.И., использование метода СКП для исследования распределение на поверхности напряжений и деформаций вплоть до разрушения материалов. – В сб.: Докл. Всероссийская конференция «молодых ученых–механиков». Сек. механика деформируемого твёрдого тела. Сочи: «Буревестник» МГУ, 2018, с. 30.

15. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Перспективы применения методов электрофизического неразрушающего контроля для исследовательских ядерных реакторов. – В сб.: Докл. III Международная конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Инновационные ядерные реакторы малой и сверхмалой мощности». Сек. Исследовательские реакторы. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018, с. 10-11.

Подписано в печать: 04.12.2018
Заказ № 12546 Тираж - 75 экз.
Бумага офсетная. Формат 60x90/16.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(977) 518-13-77 (499) 788-78-56
www.autoreferat.ru riso@mail.ru