

На правах рукописи

АЛВАХЕБА АНАС ИБРАХИМ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ
КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ
ПРИ КОНТРОЛЕ 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: Алвахеба А.И.



Москва 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день методы электрического неразрушающего контроля (ЭНК), находящиеся в процессе промышленной апробации, выходят на стадию сертификации и внедрения с целью более широкого их практического применения. Одним из последних плановых этапов, предшествующих сертификации и внедрению метода сканирующей контактной потенциометрии (СКП), является этап экспериментального и методического обоснования применения метода СКП на предприятиях атомной отрасли.

В диссертационной работе приведены экспериментальные результаты, полученные на четырех предприятиях и организациях атомной отрасли, подтверждающие высокую эффективность предложенного метода неразрушающего контроля. Цель, поставленная в работе, связана с решением ряда сложных технических задач по выявлению и идентификации дефектов структуры материалов на разных стадиях испытаний, а также при проведении контроля на производстве. Показано, что результаты ЭНК адекватно и в необходимом объеме отражают информацию о физических процессах, изменениях структуры материала, кинетики разрушения и в ряде других случаев.

Поэтому поставленный вопрос о широком практическом применении ЭНК на российских промышленных предприятиях для предэксплуатационного контроля изделий и оборудования сейчас важен и актуален.

Работа по созданию средств и методов обработки собранной информации ЭНК преследует цель достижения надежных результатов идентификации стадий накопления структурных нарушений материалов, приводящих к разрушению, для более ясного понимания происходящих процессов и возможности внешнего влияния на их развитие.

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью экспериментального развития метода СКП и научного обоснования применения ЭНК на стадии промышленного производства и предэксплуатационного контроля оборудования атомных станций в целях внедрения данного метода в производственные процессы и методы контроля отрасли.

Цель диссертационной работы

Цель работы: экспериментальное развитие и научное обоснование использования ЭНК и метода СКП для диагностики и контроля оборудования АЭС на стадии предэксплуатационного контроля, как дополнительного к другим методам НК, применяющимся в настоящее время на предприятиях отрасли, а также промышленная апробация ЭНК, и подготовка рекомендаций по методике контроля для ее практического применения отделами технического контроля предприятий отрасли.

Задачи диссертационной работы

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Разработать методику выполнения ЭНК изделий и оборудования заводского производства широкого ассортимента.
2. Разработать датчики ЭНК и измерительные устройства, исходя из геометрии, размеров объекта контроля и условий контроля.
3. Выполнить ЭНК изделий и оборудования в организациях и на предприятиях отрасли: АО «АЭМ-Технологии» «Атоммаш», ООО «Техноскан», АО «Атоммашэкспорт» и других предприятиях.
4. Выявить и идентифицировать структурные неоднородности сварных соединений обечайки центральной СС №23-1/2 и СС №23-2/2 ПГВ№4, корпуса проходки и двойной

наплавки корпуса проходки 77_AME 1314.22.02.000, а также наплавки трубы 60_AME 1314.22.02.101 и дать заключение о техническом состоянии объектов исследования.

5. Выполнить локацию структурных неоднородностей в сварных соединениях другими методами НК – ультразвуковым, радиографическим и методом дифракции тепловых нейтронов и верифицировать полученные результаты ЭНК путем сравнения их с результатами указанных методов НК.

Научная новизна полученных результатов

Спланированы, подготовлены и проведены испытания, в результате которых впервые получены следующие научные результаты:

– исследовано влияние скорости движения датчика на эффективность выявления структурных неоднородностей в контрольном сварном соединении в интервале скоростей от 0,36 до 1,8 мм/сек. Получена высокая воспроизводимость результатов контроля, которая подтверждает правильность базовых принципов методики измерений;

– получено выражение для оценки мощности излучения волн механических напряжений (деформаций) действующего источника по значению структурного уровня фиксации. Установлена корреляция величин мощности источника излучения и уровня фиксации, которая определяется наличием в объеме образца внутренних напряжений I, II и III рода;

– исследовано влияние характера соединения малых цилиндрических молибденовых вставок диаметром 1,5 мм в отверстия соответствующего диаметра в пластине из стали 12X18H10T на мощность излучения волн механических напряжений. Характер соединения вставок в отверстия соответствовал посадкам H11/d11 и H11/f11 (ГОСТ 25346-89). На потенциограммах, полученных с применением преобразователя из стали Ст 3, обнаружены все три вставки;

– исследовано изменение мощности излучения волн механических напряжений, регистрируемой на поверхности образца из стали 12X18H10T, от осколка вольфрама, заваренного внутри образца. При измерениях проводили послойное снятие материала с поверхности методом шлифования с толщиной снимаемого слоя, примерно 0,1 мм, вглубь образца на глубину 10 мм от поверхности. Наблюдали чередование областей Сен Венана в виде рефлексов различной формы и размеров, соответствующих неоднородному полю внутренних напряжений.

Практическая значимость работы

1. Разработаны новые приборы, устройства и датчики электрического неразрушающего контроля, обеспечивающие компьютерные программы, а также измерительные методики, позволяющие производить неразрушающий контроль на ограниченных по площади объектах контроля и в труднодоступных местах, где применение других методов НК не представляется возможным.

2. Расширенные функциональные возможности нового метода электрического контроля и ассортимент объектов контроля, в том числе сварных соединений обечайки центральной парогенератора ПГВ, корпуса проходки и двойной наплавки корпуса проходки, наплавки трубы технологического оборудования АЭС, позволил подготовить условия для широкого использования метода СКП в атомной отрасли.

3. Совместно с отделом ОНМК филиала АО "АЭМ-технологии" "Атоммаш" в г. Волгодонске и специалистами ЦНИИТМАШ разработан план внедрения метода СКП на предприятии АО "АЭМ-технологии" "Атоммаш" и начата работа по его реализации.

4. Полученные массивы экспериментальных данных разности электрических потенциалов для сварных соединений обечайки центральной СС №23-1/2 и СС №23-2/2 ПГВ№4, двойной наплавки корпуса проходки 77_AME 1314.22.02.000, наплавки трубы

60_AME 1314.22.02.101, предназначены для использования их в качестве библиотек справочных данных.

В процессе выполнения работ по договору №19-08-00266/19 от 10.01.2019 с Российским фондом фундаментальных исследований разработана методика совместных исследований дифракции тепловых нейтронов на нейтронном фурье-стресс-дифрактометре ФСД и контактной разности потенциалов на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ им. И.М. Франка в ОИЯИ (г. Дубна).

На предприятии ООО «Техноскан» прошли апробацию методика электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений, разработанные измерительные средства сканирующей контактной потенциометрии и программное обеспечение для представления и обработки результатов измерений.

На основании договора между АО «АЭМ-технологии» (филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске») и ВИТИ НИЯУ МИФИ в период с 2.07.2019 г. по 5.07.2019 г. выполнена научно-исследовательская работа по теме: «Электрический неразрушающий контроль сварных соединений обечайки центральной СС №23-1/2 и СС №23-2/2 ПГВ№4, в ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске» по этапу «Апробация электрофизического метода неразрушающего контроля в условиях промышленного предприятия».

Положения, выносимые на защиту

- Результаты экспериментального и методического обоснования применения сканирующей контактной потенциометрии на стадии предэксплуатационного контроля изделий и оборудования АЭС.
- Методики выполнения ЭНК и метрологическое обеспечение измерений, выполняемых при контроле состояния металла сварного соединения и исследования напряженно-деформированного состояния сталей и сплавов в специальных экспериментах.
- Измерительные средства, разработанные приборы и устройства для ручного и автоматизированного ЭНК технологического оборудования АЭС.
- Программы обработки и дискриминации сигналов контроля по амплитуде методом последовательной фильтрации, с целью локации спаренных дефектов (двойных, тройных и т.д.), которые располагаются в непосредственной близости друг от друга в горизонтальной, либо в вертикальной плоскости (друг под другом).
- Результаты исследования сварных соединений образцов из стали 12X18H10T 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 неоднократно обсуждались со специалистами и экспертами Росатома, а также докладывались на следующих научных конференциях:

XIII Международная научно-техническая конференция «Будущее атомной энергетики» (Обнинск: 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); XIII International Youth Scientific and Practical Conference "FUTURE OF ATOMIC ENERGY – Atom Future 2017" (Москва, 2017); XXI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (Санкт-Петербург, 2018); XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2018); VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ,

Москва, 2018); 18-я Международная научно-практическая конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018)» (Москва, 2018); XV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров 2018» (Обнинск, 2018); 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2018); XXVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2019» (Москва, 2019); 11-ая Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2019); VIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ, Москва, 2019); XV Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» (ВИТИ НИЯУ МИФИ, Волгодонск, 2019); XXII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 2020).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 33 печатных работ, отражающих основное содержание диссертации, из них 3 статьи в изданиях, входящих в базы цитирования ВАК, и 4 статьи в Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемой литературы и приложения. Объем работы 183 с., рисунков – 148, таблиц – 5, приложений – 1, список литературы содержит 46 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе показано, что структурные неоднородности в сварных соединениях и в специально приготовленных образцах интенсивно излучают волны упругих напряжений. В металлах возникновение волн упругих напряжений вызывает колебания близлежащих к источнику слоев и приводит к периодическому сжатию и разрежению объема металла в этом месте. Возникающее избыточное давление воздействует на соседние элементы объема, которые, в свою очередь, воздействуют на следующие объемы, и т.д. Описанный колебательный процесс доходит до поверхности образца и передается через микроскопические пятна контактов от образца к преобразователю.

В рамках выполнения договорной работы по гранту РФФИ разработана измерительная методика и проведены эксперименты на исследовательском реакторе ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в ОИЯИ г. Дубна. В процессе физико-механических испытаний различных материалов были выполнены совместные измерения методами СКП и дифракции тепловых нейтронов.

Проведены исследования сварных соединений образцов из стали 12X18H10T.

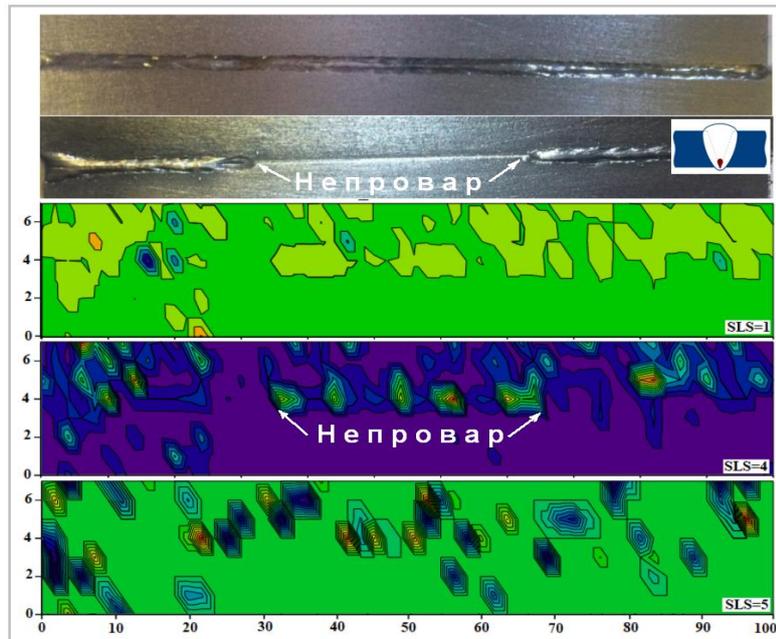


Рисунок – 1. Изображение сварного соединения образца №1 (12X18H10T) с указанным непроваром корня (вверху) и потенциограммы, полученные при различных значениях SLS. Преобразователь выполнен из стали Ст3.

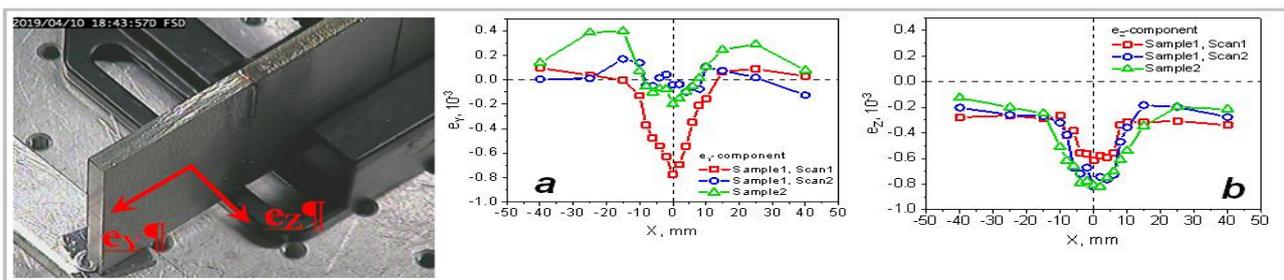


Рисунок – 2. Образец в процессе сканирования (слева). Показаны направления компонент деформации e_y и e_z . Справа: измеренные компоненты тензора остаточной деформации e_y (a) и e_z (b) для образцов №1 и №2. Ориентация компонент деформаций: e_y – поперечная компонента в плоскости пластины поперек сварного шва, e_z – нормальная компонента, перпендикулярная плоскости пластины. Центр сварного соединения соответствует координате $X=0$.

В соответствии с ГОСТ 7512-82 непровар (рисунок 1) идентифицирован как прерывистый непровар в корне или недостаточно проваренный сварной шов ($Hk12$, графическое обозначение дефекта вверху на вставке, на рисунке 1). Относительно высокий уровень фиксации непровара ($SLS=4$) свидетельствует о высоком значении остаточных напряжений.

На рисунке 2 представлены результаты измерения компонент тензора остаточной деформации для образцов №1 и №2 (12X18H10T) методом дифракции тепловых нейтронов. Как следует из результатов дифракционного анализа величина тензора остаточной деформации на приведенных диаграммах соответствует степени упругой деформации.

Исследовано влияние характера соединения малых цилиндрических молибденовых вставок диаметром 1,5 мм с отверстиями соответствующего диаметра в пластине из стали 12X18H10T на мощность излучения волн механических напряжений. В процессе исследования сварных соединений стальных пластин был подготовлен специальный образец из стали 12X18H10T с молибденовыми вставками-штифтами, зафиксированными внутри пластины. С торцевой стороны одной из пластин были просверлены три отверстия диаметром 1,5 мм на разном расстоянии от лицевой плоскости образца (рисунок 3), куда были помещены вставки. Характер соединения вставок в отверстия соответствовал

посадкам Н11/d11 и Н11/f11 (ГОСТ 25346-89). На рисунке 4 приведены потенциограммы сварного соединения образца с молибденовыми вставками, полученные для различных материалов, из которых были изготовлены электрофизические преобразователи. Как видно из рисунка все три молибденовые вставки были обнаружены в процессе измерений методом СКП. Как и в предыдущем случае, данные дифракции тепловых нейтронов показывают значения деформации в местах расположения молибденовых вставок, соответствующие упругим деформациям. Для соединения с большим зазором (Н11/d11) вставку удалось обнаружить только с применением стального преобразователя (рисунок 4).

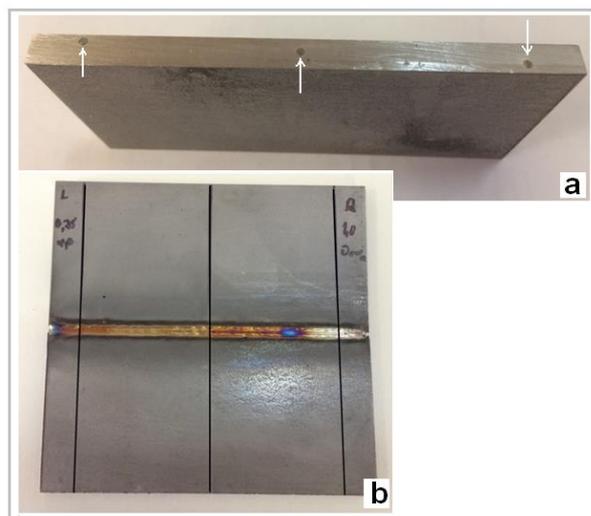


Рисунок – 3. Торцевая сторона пластины с просверленными отверстиями (а) и лицевая сторона с темными линиями вдоль которого производилось сканирование нейтронным пучком (b).

В процессе контактной потенциометрии указанных образцов и изделий наблюдаются следующие закономерности. По мощности излучения волн упругих напряжений все неоднородности делятся на несколько видов. Мощные источники регистрируются на уровне фиксации, равном $SLS=1$ или 2 и условно соответствуют напряжениям I рода. Менее мощные источники регистрирую на уровне фиксации $SLS=(2-4)$ и относятся к напряжениям II рода, возникающем в результате междузеренного взаимодействия. И, наконец, источники, относящиеся по мощности излучения к напряжениям III рода, регистрируются на высоких уровнях фиксации при $SLS>4$.

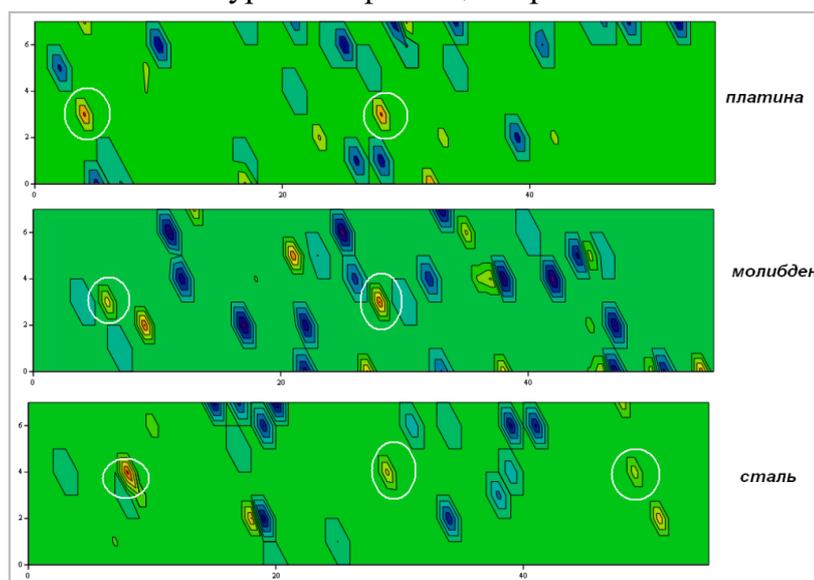


Рисунок – 4. Потенциограммы образца №4 для различных материалов преобразователя при уровне фиксации $SLS> 5$. На самой нижней потенциограмме преобразователь изготовлен из стали Ст3. По оси x – число отсчетов, по оси y – номера дорожек.

Получено выражение для оценки мощности излучения волн механических напряжений (деформаций) по значению структурного уровня фиксации:

$$W_{\text{ВМН}} = 10^{-2SLS},$$

где $W_{\text{ВМН}}$ – мощность излучения.

При исследовании сварного соединения в бруске из стали 09Г2С, приготовленного с присадочным материалом из стали 08Г2С и подвергнутого изгибу, при температуре, равной 50°C, обнаружена неоднородность в той части сварного соединения, где действуют наибольшие остаточные сжимающие напряжения. Одиночный рефлекс на обеих рабочих сторонах образца (уровень фиксации $SLS=5,23$ с одной стороны и $SLS=6,699$ – с другой стороны) появляется в одном и том же месте, симметрично продольной оси, на третьей и четвертой измерительных дорожках (рисунок 5). По результатам дифракционного анализа установлено, что максимальные значения тензора остаточных напряжений в этой зоне соответствуют упругим напряжениям. Высокий уровень фиксации неоднородности ($SLS\sim 5-6$) в сочетании с низким значением тензора остаточных напряжений характеризует наличие упругих напряжений в этой области.

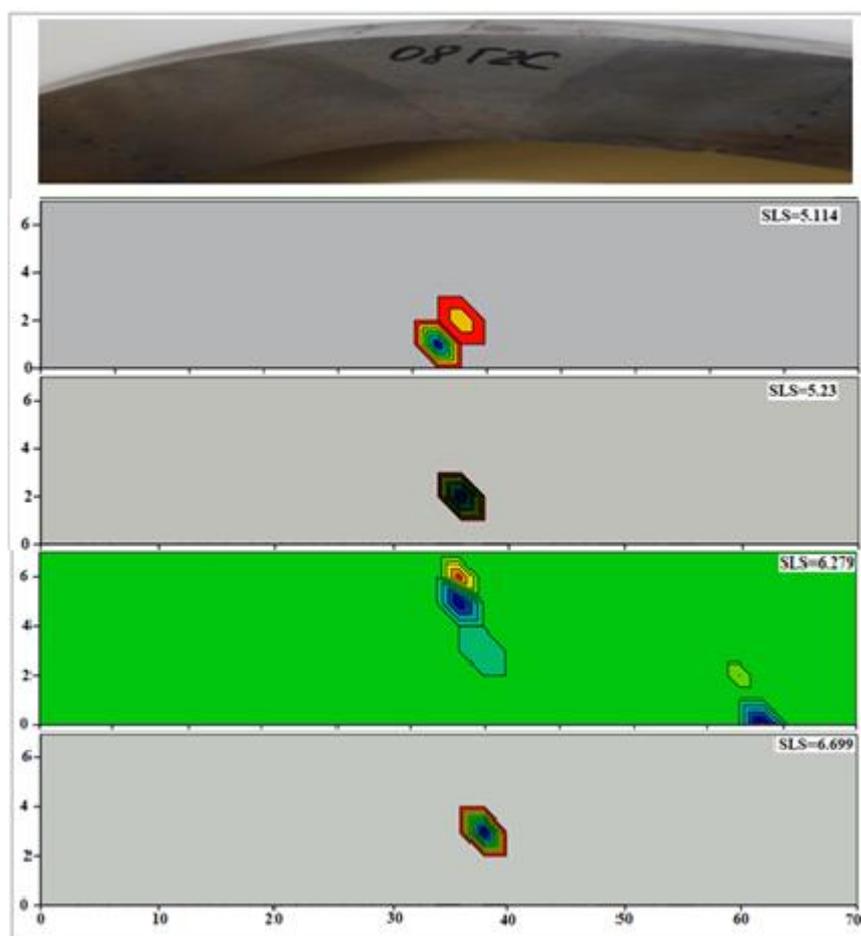


Рисунок – 5. Поверхностные потенциограммы стального бруса с изгибом при температуре 50°C для различных значений SLS (сторона образца А) – 5,114 и 5,23 и сторона В – 6,279 и 6,699.

Следует различать результаты действия упругих и пластических деформаций (напряжений) на чувствительный элемент электрофизического преобразователя при измерениях. В результате образования на поверхности пластической деформации и появления дислокационных ступенек, диполей и других дефектов, происходит увеличение числа и площади пятен микроскопических контактов преобразователя с образцом. С этим связано увеличение амплитуды сигнала в процессе ползучести, за счет усиления интенсивности электронных переходов через образующиеся пятна контактов и границу раздела.

Передающаяся при этом через пятна контактов упругая энергия воздействует на электронную систему преобразователя. Закон дисперсии электронов изменяется вследствие динамических изменений параметра решетки и соответствующих изменений в обратном пространстве.

Известны два основных механизма релаксации внутренних напряжений: первый, с образованием дислокаций и дислокационных структур. При высокой степени деформации данный механизм трансформируется в механизм образования трещины, который сопровождается излучением упругих волн с высокой скоростью. В этом случае не происходит заметного увеличения числа пятен контакта, а на временных диаграммах появляются скачки в виде δ -функций. На поверхностных потенциограммах при этом наблюдается картина, на которой присутствуют высокие цветовые градиенты, соответствующие перепадамы значений электрического потенциала.

Рассчитывали дискретное преобразование Фурье (ДПФ) $\Phi[k]$ функции изменения амплитуды сигнала контроля во времени φ :

$$\Phi[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \varphi[n] \exp\left(\frac{-i2\pi kn}{N}\right).$$

Дискретное преобразование Фурье ($0 \leq k < N$) функции φ с периодом N вычисляли по ее значениям в интервале $0 \leq n < N$. Дискретная сумма ряда Фурье определена для сигнала с периодом N . Значения функций $\varphi[0]$ и $\varphi[N - 1]$ на концах интервала, как правило, были одного порядка. Дискретное преобразование Фурье с окном $g[n]$ для периодической функции $\varphi[n]$ рассчитывали, используя выражение:

$$Q[m, l] = \sum_{n=0}^{N-1} \varphi[n] g[n - m] \exp\left(\frac{-i2\pi ln}{N}\right)$$

для каждого значения m в интервале $0 \leq m < N$ и значения l в интервале $0 \leq l < N$ с помощью произведения указанных функций $\varphi[n]g[n - m]$.

В качестве оконной функции использовали функция Хемминга, Ханна и другие известные оконные функции.

Мощность излучения источника $W_{ВМН}$ определяли по интегральной характеристике:

$$W_{ВМН} = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi(t))^2 dt,$$

которую представляли, согласно теореме Парсеваля, как среднюю мощность чисто резистивной нагрузки, равной 1 Ом, к концам которой приложено электрическое напряжение $\Delta\varphi(t)$, $\Delta T = (t_2 - t_1)$ – временной интервал для функции $\Delta\varphi(t)$.

Использование ПАД с высоким разрешением по амплитуде сигнала, начиная с самого высокого значения SLS и далее, двигаясь вниз, и применение формализма ДПФ с частотно-временными окнами позволяет эффективно идентифицировать структурные неоднородности, в том числе и образующиеся спаренные дефекты (рисунок б). Метод последовательной фильтрации на основе узкополосного фильтра ПАД с шагом 0,1 мкВ, позволяет определить спаренные дефекты (двойные, тройные и т.д.), которые располагаются в непосредственной близости друг от друга в горизонтальной, либо в вертикальной плоскости (друг под другом).

При исследовании образца со специально просверленными отверстиями и поперечными пазами, данные дефекты были выявлены на низком уровне фиксации при $SLS \sim 2-3$. Под нагрузкой при напряжении 50 МПа потенциограмма образца с отверстиями для уровня $SLS = 3$ не существенно отличается от потенциограммы образца без нагрузки.

Таким образом, упругая деформация при растяжении образца незначительно влияет на наблюдаемые результаты. Отличия геометрического расположения рефлексов на потенциограммах (рисунок 7), вероятно, связаны с погрешностью ручного контроля, а также с появлением дополнительных рефлексов от других структурных неоднородностей, которые экранируют или накладываются друг на друга.

Последовательно снижая уровень детектирования, начиная с наиболее высокого уровня, на потенциограммах наблюдали поочередное появление одиночных структурных неоднородностей, которые затем идентифицировали со всеми просверленными отверстиями и поперечными пазами.

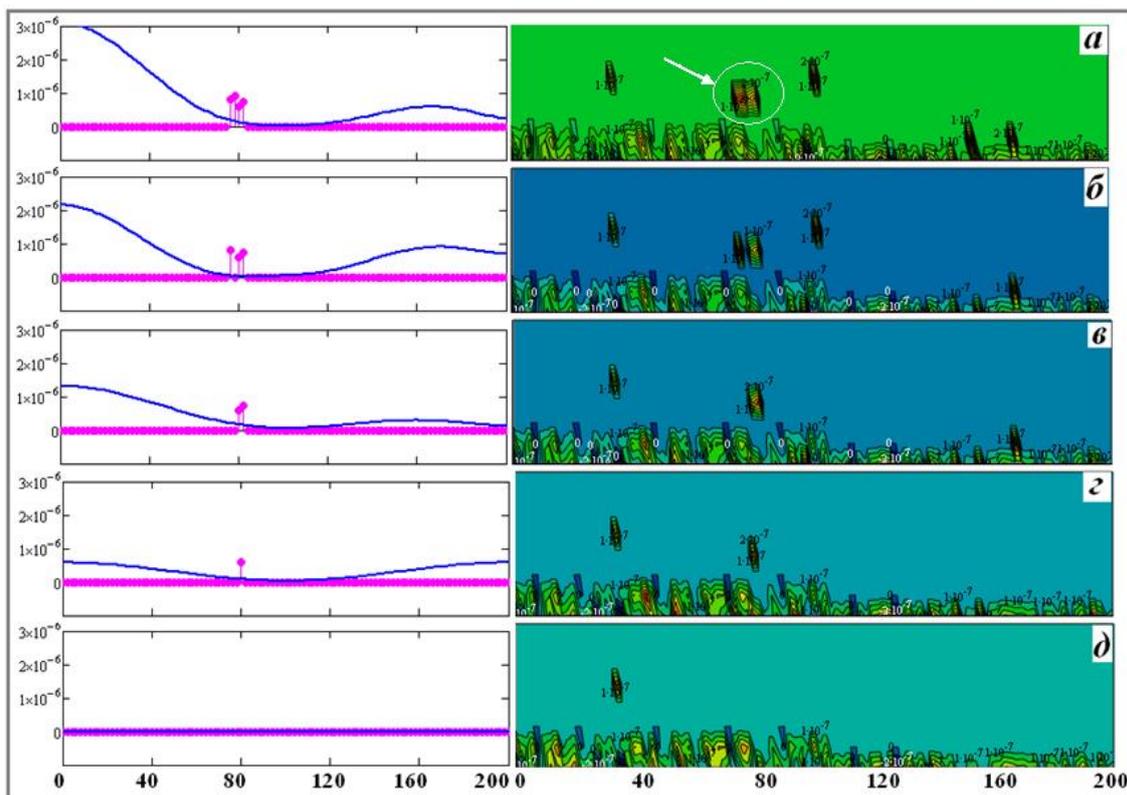


Рисунок – 6. Изображения спаренных двойников в контрольном сварном соединении. Двойники выделены на рисунке *a* в белый круг и показаны стрелкой. С левой стороны рисунков приведены линейные потенциограммы (розового цвета) и кривые ДПФ с окном Хемминга (синего цвета). Изображения получены для высоких значений *SLS*: *a* – 6; *б* – 6,046; *в* – 6,097; *г* – 6,155; *д* – 6,26.

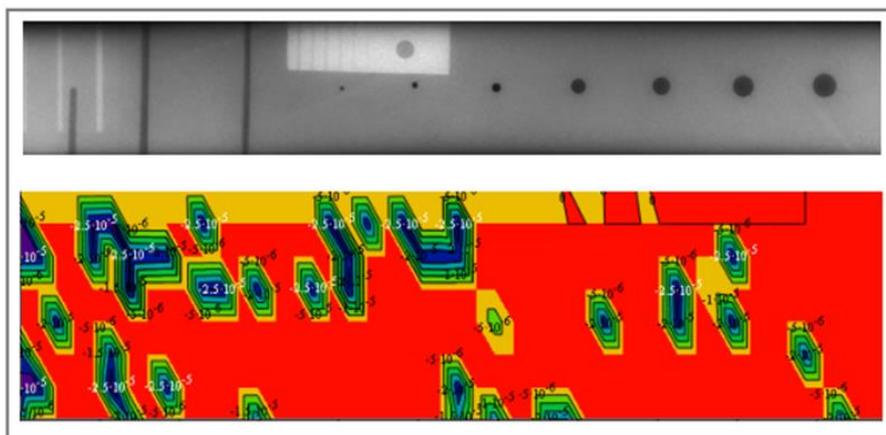


Рисунок – 7. Рентгенограмма (вверху) и потенциограмма (внизу) образца с отверстиями для *SLS* =4,509. Режим нагрузки 50 МПа.

Пример применения ДПФ к образцу с отверстиями при нагрузке 200 МПа показан на рисунке 8.

Наблюдается существенное отличие при анализе поверхностных потенциограмм, построенных для сварных соединений и потенциограмм для образца с отверстиями. Для образца с отверстиями для всех уровней фиксации на потенциограммах присутствуют только одиночные рефлекссы или их небольшие объединения. На этих потенциограммах нет полос, проходящих по середине или вдоль продольной оси симметрии. характерных непровару корня или смещению кромок шва.

Важно отметить, что метод последовательной дискриминации амплитуды сигнала при выполнении ЭНК следует применять для всех изделий и объектов контроля.

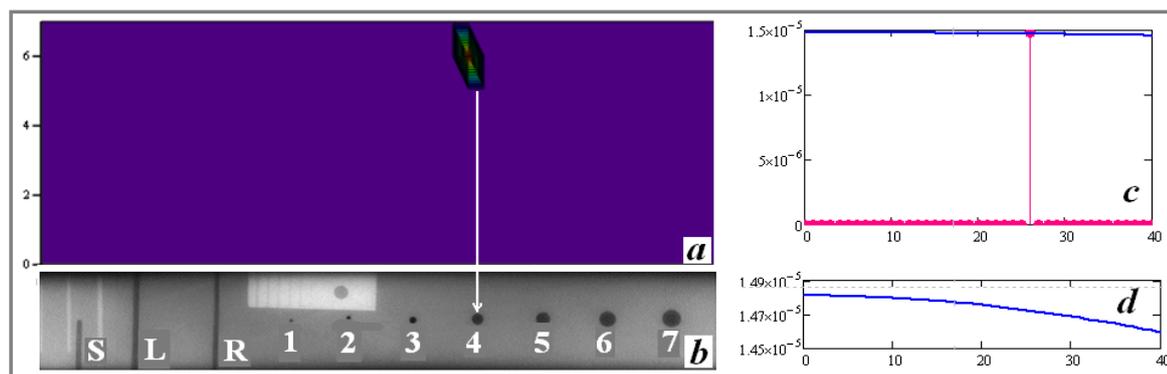


Рисунок – 8. Поверхностная потенциограмма с изображением одиночной структурной неоднородности, обнаруженной на седьмой измерительной дорожке на уровне детектирования сигнала $SLS = 4,824$ (a), радиографический снимок образца с отверстиями (1...7), пропилами (L,R) и поперечным отверстием (S) (b).

Исследовано изменение мощности излучения волн механических напряжений, регистрируемой на поверхности образца из стали 12X18H10T, от осколка вольфрама, заваренного внутри образца. При измерениях проводили послойное снятие материала с поверхности методом шлифования с толщиной снимаемого слоя, примерно 0,1 мм, вглубь образца на 10 мм от поверхности. На разных уровнях фиксации наблюдали области Сен Венана в виде рефлекссов различной формы и размеров. Установили, что в интервале амплитуд, соответствующих уровням фиксации от $SLS=3,229$ до $SLS=5,31$ на потенциограммах отсутствуют видимые изменения, что равносильно отсутствию компонент сигнала контроля с указанными амплитудами. (Рисунок 9)

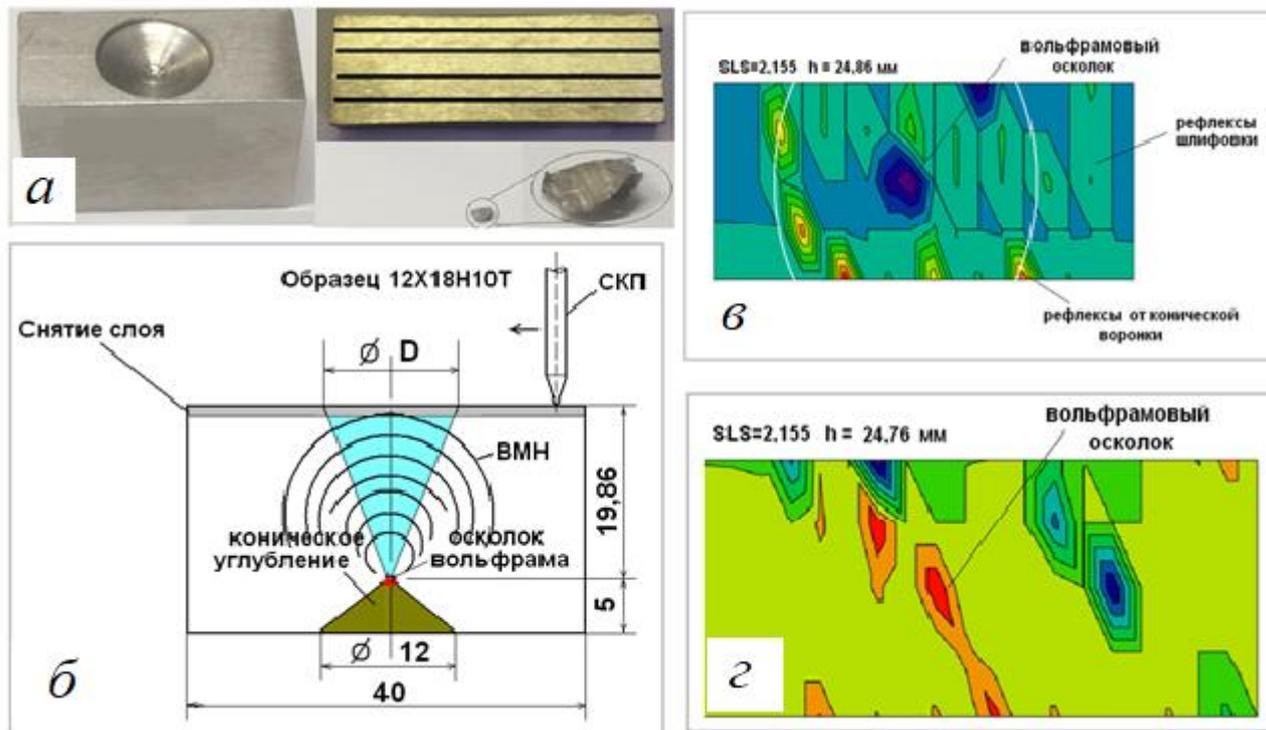


Рисунок – 9. Приготовление образца из стали 12X18H10T с неоднородностью в виде осколка вольфрама для послойного измерения распределения электрических потенциалов на поверхности (а). Схема эксперимента последовательного снятия слоев материала с заваренным внутри образца осколком вольфрама (б). Две потенциограммы в увеличенном масштабе для молибденового преобразователя и уровня фиксации $SLS=2,155$ (в и г). На рисунке в высота образца равна 24,86 мм, на рисунке г – 24,76 мм.

Во второй главе исследовано влияние скорости движения датчика на эффективность выявления структурных неоднородностей в контрольном сварном соединении (КСС). Для этого использовали различные режимы работы разработанного прибора *Spectroelph-FRR-450*: от линейной скорости 0,36 до 1,8 мм/сек (рисунок 10).

При выбранных скоростных режимах, когда максимальная и минимальная скорости отличаются в пять раз, средние значения разности электрических потенциалов на соответствующих измерительных дорожках близки между собой. Полученный результат подчеркивает высокую воспроизводимость данных и правильность базовых принципов измерительной методики. Наблюдаемый разброс точек на графике изменения разности потенциалов от номера измерительной дорожки превышает погрешность измерений и связан с процессом излучения структурными неоднородностями волн механических напряжений.

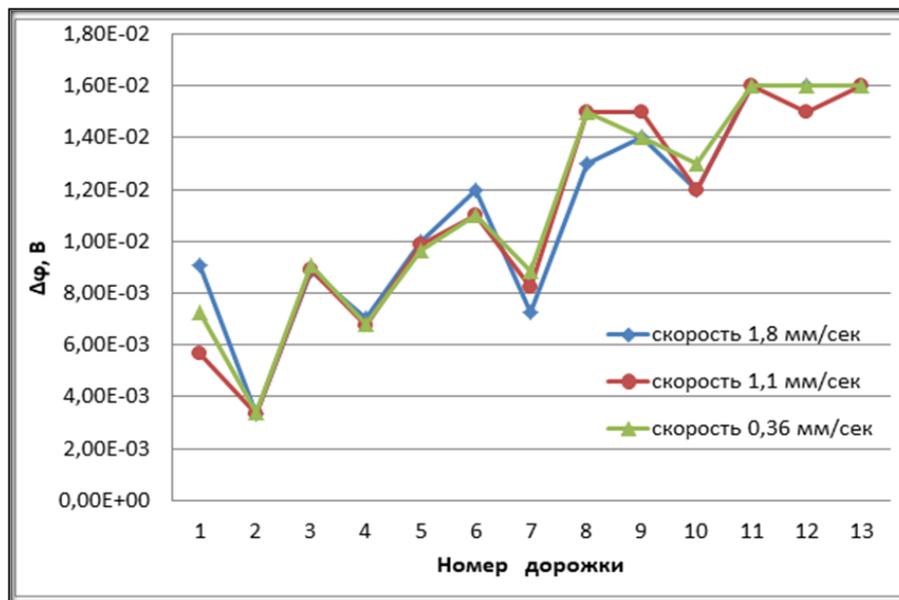


Рисунок – 10. Влияние скорости линейного сканирования преобразователя (из стали Ст3) на среднее значение контактной разности потенциалов при комнатной температуре. Измерения выполнялись по тринадцати измерительным дорожкам КСС.

На среднее значение амплитуды сигнала контроля влияет не только количество неоднородностей, но и их структурный тип или излучательная способность (например, непровар корня, смещение кромок, свищ и т.д.).

Исследовано влияние нестационарного температурного режима, а также пропускания через образец постоянного электрического тока на интенсивность излучения волн механических напряжений и соответствующее изменение амплитуды сигнала.

Пропускание малых токов через образец приводит к уменьшению среднего значения амплитуды сигнала, по сравнению с режимом без тока, более чем в десять раз. Однако, с увеличением силы тока от 0,01 до 0,1 А, среднее значение разности потенциалов возрастает в 6-7 раз. Полученный результат связан с усилением эффекта контактной разности потенциалов и уменьшении работы выхода электронов с поверхности контрольного сварного соединения при увеличении силы тока за счет роста числа линий тока через биметаллический контакт. В результате этого изменяется электропроводность пятен контакта.

При пропускании постоянного тока через образец удовлетворительно выявляются такие неоднородности, как непровар корня, смещение кромок КСС и другие неоднородности. Нагрев образца активизирует излучение волн упругих напряжений от менее мощных источников, имеющих меньшую интенсивность излучения и расположенных хаотично по объему образца. Такими неоднородностями могут быть включения, отдельные поры, скопления пор и другие.

Мощность излучения волн упругих напряжений при длительной выдержке контрольного сварного соединения при нормальных условиях уменьшается, что приводит к размытию изображений неоднородностей на потенциограммах за счет интерференционных эффектов.

Исследовано изменение среднего значения амплитуды сигнала контроля в зависимости от выбранного материала преобразователя при линейной скорости сканирования 8 мм/сек. Поскольку контактная разность потенциалов зависит от работы выхода контактирующих металлов, выбором материала преобразователя в определенных границах можно регулировать эффективность обнаружения отдельных дефектов. Это

подтверждается сравнением экспериментальных результатов, полученных при использовании преобразователей из нержавеющей стали X18H10T, платины, и стали Ст3.

Разработана методика выполнения ЭНК изделий и оборудования заводского производства. Программа предэксплуатационного ЭНК была изменена в соответствии с условиями и параметрами контроля сварных соединений обечайки парогенератора №23-1/2 и СС №23-2/2 ПГВ№4.

Целью проведения ЭНК являлось:

- выявление и фиксация неоднородностей (трещин, отслоений, прожогов, свищей, наплывов, усадочных раковин, подрезов, брызг металла, непроваров, скоплений и неодионых включений);

- оценка соответствия состояния металла установленным требованиям;

- обоснование возможного использования метода ЭНК на стадии технологической сборки корпуса парогенератора и контроля операции выполнения СС в заводских условиях.

Для достижения поставленных целей ЭНК в заводских условиях, были разработаны датчики для ручного поточечного сканирования со сменными преобразователями и электрофизический сканер поверхности *Spectroelph-FRR-450*. Измерительный прибор адаптирован к проведению измерений на горизонтально расположенных образцах и имеет почти вдвое большую измерительную базу по сравнению со своим предшественником.

При разработке процессов измерений с учетом заводских условий оценивались риски, связанные с недостоверностью измерительной информации, и определялись показатели точности.

На всех этапах проведения экспериментальных работ периодически (с интервалом один раз в полгода) выполнялась самопроверка измерительных средств и информационно-измерительной системы в целом.

Проверка проводилась в установленном порядке (ГОСТ 8.497-83) при соответствующих условиях:

- температура окружающего воздуха для приборов классов точности 0,001-0,05 соответствовала значению $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$;

- относительная влажность воздуха соответствовала 30...80%;

- атмосферное давление соответствовало 84...106 кПа;

Поверяемые приборы готовились к работе в соответствии с технической документацией на приборы Agilent 34401A Multimeter Data Sheet. Приборы проверялись на постоянном токе совместно с соединительными проводами, входящими в их комплект. Оценка точностных параметров проводилась на рабочих диапазонах, соответствующие показания цифрового табло измерительного прибора $(0,1...1) 10^{-6}$ В.

Разработанная компьютерная программа использовалась для построения потенциограмм и позволяла получать эффект масштабирования изображений, наблюдаемых на потенциограммах. Вид поверхностных потенциограмм определяется заданной функцией экстраполяции и накладываемыми на нее граничными условиями. Программа фрагментирует участки поверхности по принципу равных значений амплитуды, ограничивает их замкнутой линией и окрашивает эти участки в определенный цвет. Участки с максимальной амплитудой сигнала, для выбранного значения уровня фиксации, окрашиваются в красно-оранжевые тона, с минимальными положительными или отрицательными значениями – в сине-голубые тона.

Погрешность определения координат неоднородностей при ручном сканировании составляет, в каждом конкретном случае, от одного до двух миллиметров. В случае использования автоматизированных приборов и устройств погрешность может быть уменьшена до значения 0,1 мм и менее.

В третьей главе приведено описание разработанной методики исследования напряженно-деформированного состояния материалов при испытаниях на растяжение с применением метода СКП. Данная методика предназначена для исследования относительно тонких образцов, для которых излучение от слабого источника, находящегося внутри образца, экранируется верхними слоями не полностью и поэтому есть возможность его локации за счет применения линейного сканирования поверхности.

Исследовано напряженно-деформированное состояние в составных образцах, сваренных из сталей 12X18H10T и 14X17H2, а также из стали 09Г2С, в испытаниях на растяжение на машине Р-10М-Авто.

Показано, что для стали 12X18H10T, начиная с напряжений, близких к пределу текучести на высоких уровнях фиксации происходит смещение рефлексов на потенциограммах в левую часть образца. При более высоких нагрузках, с усилением процесса интенсивного образования пластической деформации в средней части образца, данная тенденция сохраняется. Начиная с уровня фиксации $SLS=3,301$ и далее, вплоть до уровня 5,09, на потенциограммах четко видны рефлекс от отдельных источников. Кроме этого, с увеличением значений SLS происходит уменьшение рефлексов в средней части образца, и при значении $SLS = 5,09$ в этой области остается всего лишь один крупный рефлекс.

При испытаниях образца из стали 09Г2С, при напряжении 300 МПа, уже на самом низком уровне фиксации на потенциограммах видны отдельные рефлекс. Одновременно с этим, в центре образца формируется мощный концентратор напряжений, который хорошо наблюдается на уровне фиксации $SLS=5,415$, а в правой части образца продолжается процесс концентрации неоднородностей, что хорошо видно на уровне фиксации $SLS=4,949$ (рисунок 11).

Выявленные закономерности для образцов из сталей 12X18H10T и 09Г2С наблюдались и для образца из стали 14X17H2.

Последовательное применение амплитудной дискриминации к результатам измерений и использование частотно-временной локации неоднородностей позволяет структурировать небольшие объединения дефектов, разделяя их по мощности и по глубине залегания.

В четвертой главе обсуждаются результаты электрического неразрушающего контроля с применением измерительных средств контактной потенциометрии, который проводился в заводских условиях в АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», город Волгодонск. Объектом исследования были сварные соединения обечайки центральной СС №23-2/2 и №23-2/3 для ПГВ№4.

Для обеспечения ЭНК сварных соединений обечайки центральной в заводских условиях использовались усовершенствованные измерительные средства и методики СКП:

- разработанная программа ЭНК сварного соединения узла приварки коллектора парогенератора;
- разработанная методика измерений на основе метода СКП и средства для проведения ручного контроля;
- разработано и изготовлено автоматизированное устройство контроля;
- разработана информационно-измерительная система сбора и обработки результатов контроля.

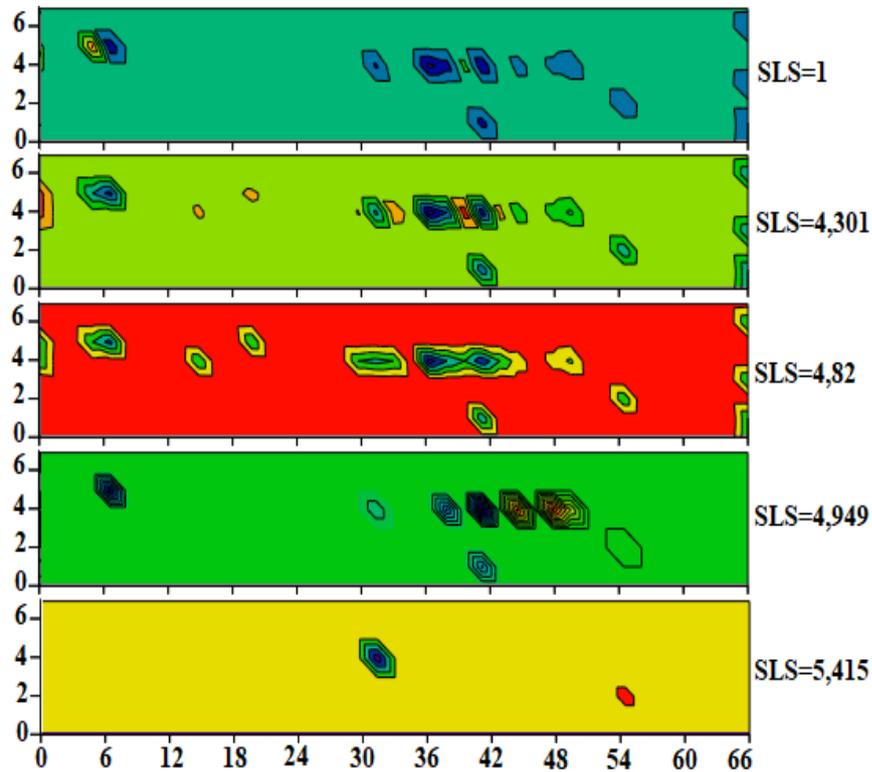


Рисунок – 11. Линейно-поцикловая потенциограмма образца из стали 09Г2С при напряжении 300 МПа и различных значениях SLS.

Полученные результаты пред эксплуатационного контроля представляют собой архив измерительной информации, который в дальнейшем может быть дополнен и использован для контроля состояния металла при эксплуатации указанной обечайки в условиях эксплуатации.

Контроль состояния металла сварных соединений обечайки центральной СС №23-2/2 и №23-2/3 ПГВ№4 осуществлялся ручным поточечным сканированием. В соответствии с разработанной методикой, шаг измерений был равен 5–10 мм. Измерения выполнялись по восьми измерительным дорожкам. Абсолютная погрешность определения координат дефектов при ручном контроле составляет от одного до двух миллиметров. При проведении ЭНК использовали мобильную информационно-измерительную систему на базе ноутбука Asus X554L с измерительным прибором, мультиметром Agilent 34401A.

Дополнительно при обработке результатов контроля использовали интегральное преобразование Фурье. Для классификации структурных неоднородностей с небольшими линейными размерами использовали метод частотно-временного анализа с окном Хемминга.

В соответствии с разработанной концепцией контактной потенциометрии были расширены функциональные возможности электропотенциального метода, представленные в разработанном методе СКП.

Научно обоснована и подтверждается полученными результатами контроля целесообразность использования метода ЭНК на стадии технологической сборки парогенераторов типа ПГВ 1000М и контроля операции выполнения сварных соединений в заводских условиях.

По результатам контроля построены потенциограммы для различных структурных уровней фиксации сигнала SLS (рисунок 12). Классификация обнаруженных структурных неоднородностей в сварных соединениях была выполнена путем сопоставления их с известными структурными неоднородностями, выявленными ранее на специально подготовленных контрольных сварных соединениях. Анализ потенциограмм проводили методом последовательной фильтрации сигналов с помощью разработанного

программируемого амплитудного дискриминатора измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 40 дБ. При анализе сигналов ЭНК и оценке влияния шумовой (случайной) составляющей применяли вейвлетный анализ. Отношение «сигнал-шум» в процессе измерений изменялось в пределах от 10 до 50 дБ в зависимости от уровня сигнала контроля.

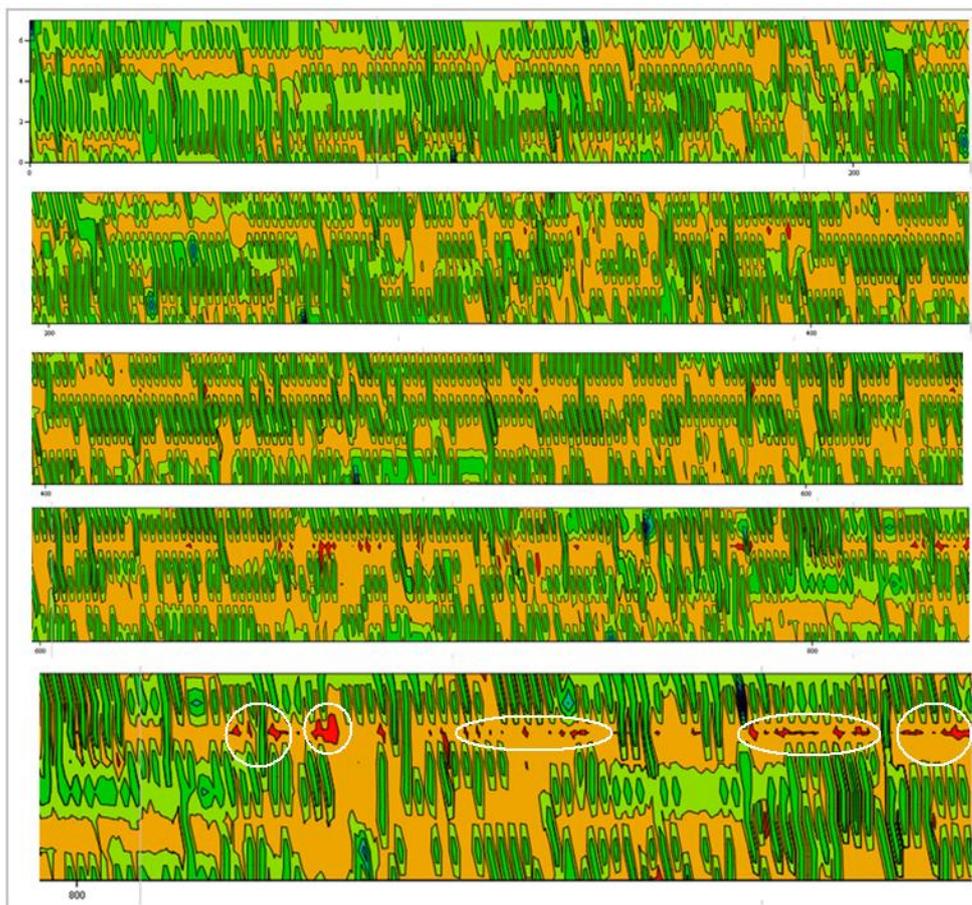


Рисунок – 12. Поверхностная потенциограмма для обечайки центральной СС 23-2/2, ПГВ№4. Потенциограмма состоит из отдельных последовательных фрагментов от начала координат и до последнего измерительного отсчета для уровня $SLS = 4,398$. Преобразователь изготовлен из стали X18N10T.

Результаты анализа потенциограмм сводятся к следующему:

1. Высокие значения амплитуды сигнала на $SLS=1,699$ для СС №23-2/2 и №23-2/3 ПГВ№4 говорят о высокой излучательной способности источников остаточных напряжений, образующихся в СС после сварочных работ.

2. Контрастные цветовые рефлексии на потенциограмме группируются вдоль трех осевых направлений, которые условно связаны с осью корня СС и осями разделки СС: верхней (отображается на верхней части потенциограмм) и нижней (отображается на нижней части потенциограмм).

3. На потенциограммах цветовые рефлексии имеют вид вытянутых овалов или окружностей, а также узких и широких полос, которые располагаются перпендикулярно оси сварного соединения. Обнаруженные овалы и полосы связываются с металлом, застывшим в процессе сварки на различной глубине залегания. Указанные цветовые рефлексии обусловлены локализованными зонами с высоким значением остаточных напряжений.

4. Используя принцип дискриминации структурных неоднородностей и дискретное преобразование Фурье с оконной функцией Хемминга показана последовательность и

алгоритм определения координат структурных неоднородностей, зарегистрированных в процессе измерений. Методы обработки позволяют разделять небольшие спаренные неоднородности (двойные, тройные и т.д.), а также определять координаты кластерных скоплений.

5. В процессе ЭНК не обнаружено структурных неоднородностей (непроваров, несплавлений металла и других дефектов), выходящих за пределы установленных требований и нормативных положений, и относящихся к качеству выполнения сварочных работ.

6. Разработано и испытано в чистом зале завода автоматизированное измерительное устройство для поиска структурных нарушений в СС в автоматическом режиме.

7. По результатам проделанной работы подготовлены предложения расчетно-экспериментального обоснования применения метода СКП для неразрушающего контроля изделий и технологического оборудования АЭС, а также общие рекомендации по использованию ЭНК для контроля сварных соединений в заводских условиях.

Для корпуса проходки_77_АМЕ 1314.22.02.000 исследован характер взаимного расположения структурных неоднородностей по сечению наплавки (рисунок 13). Из анализа потенциограмм на различных уровнях фиксации следует, что, приближаясь к внутренней поверхности, неоднородности становятся более структурированными и менее протяженными, что можно условно принять за показатель качества сварки или квалификацию сварщика (рисунок 14). Наблюдаемые неоднородности возникают, в основном, в местах наплавки каждого последующего валика на предыдущий валик и, вероятно, связаны с остаточными напряжениями термического происхождения. Другой причиной может быть возникновение дополнительных фаз или небольших участков образовавшегося шлака и загрязнений. Ширина неоднородностей изменяется в широком диапазоне: от нескольких миллиметров до 10-15 мм и более.



Рисунок – 13. Фрагменты корпуса проходки_77_АМЕ 1314.22.02.000. Красной линией обозначена продольная ось сварного соединения корпуса с диском.

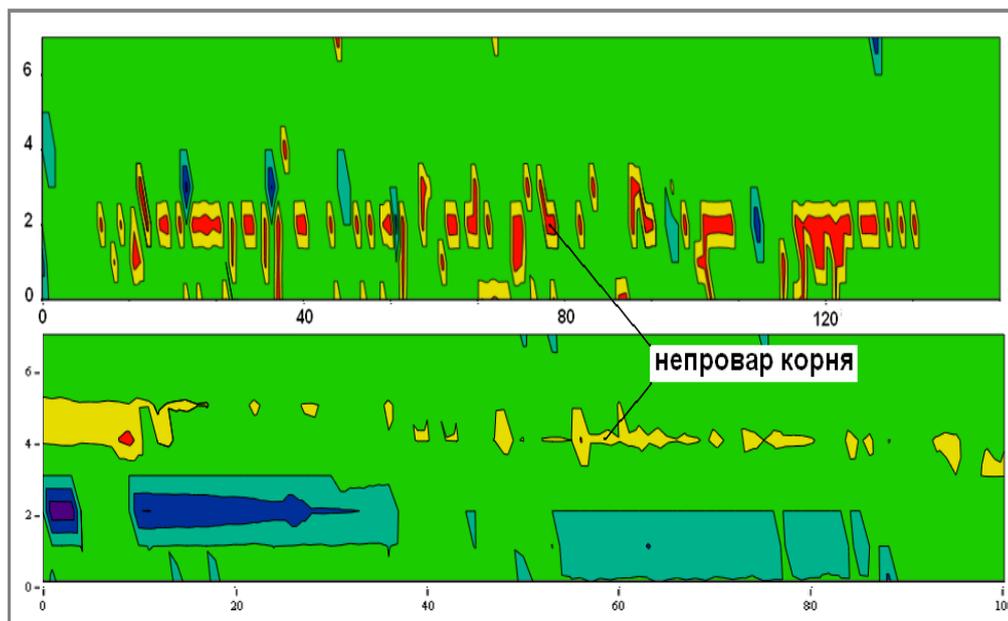


Рисунок – 14. Сравнение результатов ЭНК для двух сварных соединений: корпус проходки_77_AME 1314.22.02.000 (верхний рисунок) и контрольное сварное соединение (нижний рисунок). Уровень фиксации $SLS=4,857$.

Используя принятую классификацию неоднородных структур в наплавках, результаты ЭНК подтверждают:

- наличие неоднородностей, связанных с процессом сварки (осевые неоднородности, связанные с несплавлением валиков, появлением между ними зазоров и другие факторы);
- наличие неоднородностей по оси наплавки, локальные области, полосовые неоднородности, вызванные взаимодействием между различными частями выполняемой наплавки: осевые неоднородности могут приводить к ухудшению свариваемости наплавки;
- смеси различных типов структур, возникающих в режиме непрерывного охлаждения;
- наличие неоднородностей, связанных с нарушениями технологических параметров;
- наличие неоднородностей, связанных с образованием зерен в результате их кристаллизации из расплава и влияние микроструктуры.

Возникновение неоднородной структуры по толщине наплавки может приводить также к появлению значительных остаточных напряжений.

Для наплавки трубы _60_AME 1314.22.02.101 на низких структурных уровнях ($SLS=1.699$ и $SLS=2.301$) видны многочисленные, хаотически расположенные, неоднородности (рисунок 15). При более высоких структурных уровнях неоднородности разделяются по трем полосам вдоль осевой линии наплавки. Изображение полос обусловлено интенсивным излучением волн упругих напряжений в остывшем металле.

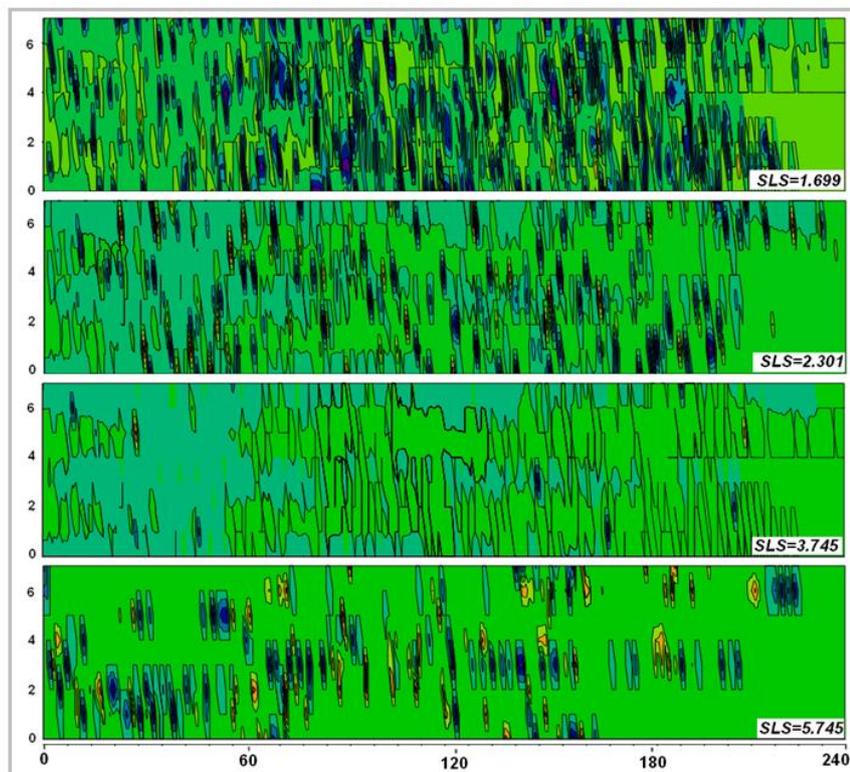


Рисунок – 15. Потенциограммы торцевой части наплавки трубы_60_АМЕ 1314.22.02.101, полученные для различных структурных уровней сигнала. По оси x обозначено число отсчетов, по оси y – номера измерительных дорожек.

В Приложении приводятся рекомендации по использованию ЭНК для выявления и фиксации неоднородностей на стадии пред эксплуатационного контроля оборудования АЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Научно обоснована целесообразность использования метода ЭНК на стадии технологической сборки парогенераторов типа ПГВ 1000М для контроля выполнения сварочных работ, а также для контроля изделий и оборудования широкого заводского ассортимента.

2. Разработаны новые приборы, устройства и датчики электрического неразрушающего контроля, обеспечивающие компьютерные программы, а также усовершенствованные измерительные методики, позволяющие производить неразрушающий контроль на ограниченных по площади объектах контроля и в труднодоступных местах, где применение других методов НК не представляется возможным.

3. Расширенные функциональные возможности метода СКП и ассортимент объектов контроля, в том числе сварных соединений обечайки центральной парогенератора ПГВ, корпуса проходки и двойной наплавки корпуса проходки, наплавки трубы оборудования АЭС, позволили подготовить условия для широкого использования метода СКП в атомной отрасли.

4. Совместно с отделом ОНМК филиала АО "АЭМ-технологии" "Атоммаш" в г. Волгодонске и специалистами ЦНИИТМАШ разработан план внедрения метода СКП на предприятии АО "АЭМ-технологии" "Атоммаш" и начата работа по его реализации.

5. Полученные массивы экспериментальных данных разности электрических потенциалов для сварных соединений обечайки центральной СС №23-1/2 и СС №23-2/2 ПГВ№4, двойной наплавки корпуса проходки 77_АМЕ 1314.22.02.000, наплавки трубы 60_АМЕ 1314.22.02.101, предназначены для использования их в качестве библиотек справочных данных при дальнейшей работе.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сурин В.И., Волкова З.С., Алвахеба А.И., Гальчин А.В. Применение методов спектрального анализа для сигналов электрофизической диагностики и неразрушающего контроля/ Информационные технологии в проектировании и производстве – М.: ФГУП ВИМИ, 2019, № 4, с.53-57.
2. Alwaheba A.I., Surin V.I., Ivanova T.E., Ivanov O.V., Beketov V.G., Goshkoderov V.A. Detection of defects in welded joint by scanning contact potentiometry//Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(3), pp. 261-277.
3. Surin V.I., Alwaheba A.I., Beketov V.G., Abu Gazal A.A. Alternative method of non destructive testing for nuclear nuclear power plant//PHYSOR 2020: Transition to Scalable Nuclear Future Cambridge. United Kingdom. 2020, 2020-March, pp. 2252-2259.
4. Surin, V.I., Alwaheba, A.I., Beketov, V.G., Abu Gazal, A.A. Results of the application of the contact potential difference method to monitor NPP process equipment//Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1636 (1), 012017.
5. Surin, V.I., Alwaheba, A.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data// Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2131 (5), 052061.