

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 620.179.1: 621.039
DOI 10.26583/gns-2023-01-04
EDN MTISAX

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА
СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС ПРИ ЕГО
ИЗГОТОВЛЕНИИ**

© 2023 Виталий Иванович Сурин¹, Александр Сергеевич Щербань²,
Александр Антонович Щербаков³, Максим Евгеньевич Жидков⁴,
Сергей Алексеевич Томилин⁵, Михаил Борисович Иваний⁶

^{1,3,6}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

^{2,4}Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Жуковское ш., 10, Ростовская обл., Россия

⁵Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹VISurin@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6153-0206>

²shcherban_as@atommash.ru

³AAScherbakov@mephi.ru

⁴zhidkov_me@atommash.ru

⁵SATomilin@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

⁶MBIvanii@mephi.ru

Аннотация. В заводских условиях проведены исследования метода сканирующей контактной потенциометрии (СКП) и продемонстрированы функциональные возможности выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов электрическим методом неразрушающего контроля (НК) непосредственно в процессе производства реакторного оборудования.

Ключевые слова: электрический неразрушающий контроль, метод сканирующей контактной потенциометрии, техническая диагностика и неразрушающий контроль реакторного оборудования.

Для цитирования: Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Жидков М.Е., Томилин С.А., Иваний М.Б. Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 36–53 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>.

Поступила в редакцию 30.11.2022

После доработки 08.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Введение

В современных условиях к качеству оборудования для российских и зарубежных АЭС предъявляются особые требования к надежности, которые определяют постоянную необходимость совершенствования системы управления качеством продукции на машиностроительных предприятиях ГК «Росатом».

Метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) на сегодняшний день изучен в полной мере и зарекомендовал себя как современный высокотехнологичный научный инструмент, обладающий уникальными особенностями. Применение метода СКП позволило решить ряд важных научных и практических задач [1–3]. Сегодня

данный метод выходит на стадию практического внедрения в промышленное производство и проходит заключительный этап экспериментальной и методической проверки на предприятиях атомной отрасли. Метод СКП имеет очевидные преимущества перед электрическими методами неразрушающего контроля (НК), используемыми в настоящее время для исследования и контроля сварных соединений [4-6].

В нашей стране нормативная и методическая документация не предусматривает проведение контроля методом СКП изделий, входящих в контур оборудования АЭС, однако, в документах МАГАТЭ нормами безопасности IAEA Safety Standards Series № Ns-G-2/6 предусмотрен электроконтактный метод неразрушающего контроля. На текущий момент существует устойчивая тенденция к гармонизации отечественной и международной нормативной документации в области атомной энергетики, в том числе и к требованиям МАГАТЭ, на основании которой метод СКП может стать обязательным к применению при производстве и эксплуатации оборудования АЭС наравне с другими объемными методами неразрушающего контроля – ультразвуковой дефектоскопией и радиографией [7-12]. Поэтому в настоящее время уже проводится подготовительная работа по разработке Государственного стандарта для применения метода СКП в атомной энергетике.

Полученные результаты предыдущих этапов работы подтверждают высокую эффективность разработанного метода НК: получаемые данные адекватно и с необходимой точностью отражают информацию о наличии дефектов, протекании физических процессов, состоянии материала, кинетики разрушения и в ряде других практических важных случаев.

В представленной статье приводятся некоторые результаты заключительного этапа исследования метода СКП в Филиале АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске.

Условия и методика проведения исследований

Две основные цели были поставлены перед проведением исследований:

1. Продемонстрировать функциональные возможности эффективного выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов методом СКП непосредственно в процессе производства реакторного оборудования.

2. Обобщить полученные результаты с имеющимися данными, чтобы подготовить рекомендации для практического внедрения метода СКП в атомную отрасль, а также для разработки нормативной документации государственного назначения.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- разработать методику (технологическую карту контроля) ручного электрического НК для проведения измерений в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск на промышленных изделиях и оборудовании широкого ассортимента;
- использовать результаты УЗК и РГК отдела методов неразрушающего контроля завода для идентификации обнаруженных несплошностей и других дефектов;
- обработать результаты контроля и идентифицировать обнаруженные дефекты;
- подготовить заключение.

Измерения выполнялись на подготовленных образцах оборудования следующих наименований:

- парогенератор ПГВ-1000М, №10, сварные соединения №111 для обоих коллекторов;
- коллектор пара, чертеж детали АМ110.05.04.000, №10. Сварные швы №3-6, №3-7, №3-9 и №3-10;
- клапан обратный АИЦН1218.1400.160302;
- труба с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540.

Методика измерений была адаптирована под заводские условия, а также использовался ранее полученный нами опыт [3].

Непосредственно перед проведением электрического НК производится визуальный контроль поверхности. Для ручного сканирования применяли датчики ручного контроля, специальные измерительные ячейки и трафареты. Измерительный прибор, в данном случае мультиметр Keysight, и программно-аппаратный комплекс мобильной диагностической системы «Elphyslab – АМ», размещенной на ноутбуке Huawei, устанавливались на столе вблизи объекта контроля. Поверхность электрофизического преобразователя и поверхность контроля протирались спиртовым раствором.

Шаг сканирования вдоль трека составлял от 1 до 10 мм. Частота дискретизации измерений была равной 1 Гц. В зависимости от размеров объектов контроля число треков сканирования изменялось в пределах от 5 до 20. Расстояние между треками составляло от 1 до 5 мм.

Результаты исследований

1. Парогенератор ПГВ-1000М №10_АМ 110.05.04.000

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся коллектор пара. Контролируемым элементом являлись сварные соединения №111-1.

Построены потенциограммы для коллектора №1 (рис. 1) и коллектора №2 парогенератора ПГВ-1000 М, наименование АМ 110.05.02.110 и АМ 110.05.02.111. Анализ потенциограмм проводился на различных уровнях фиксации, как правило, начиная с низких уровней и заканчивая высокими.

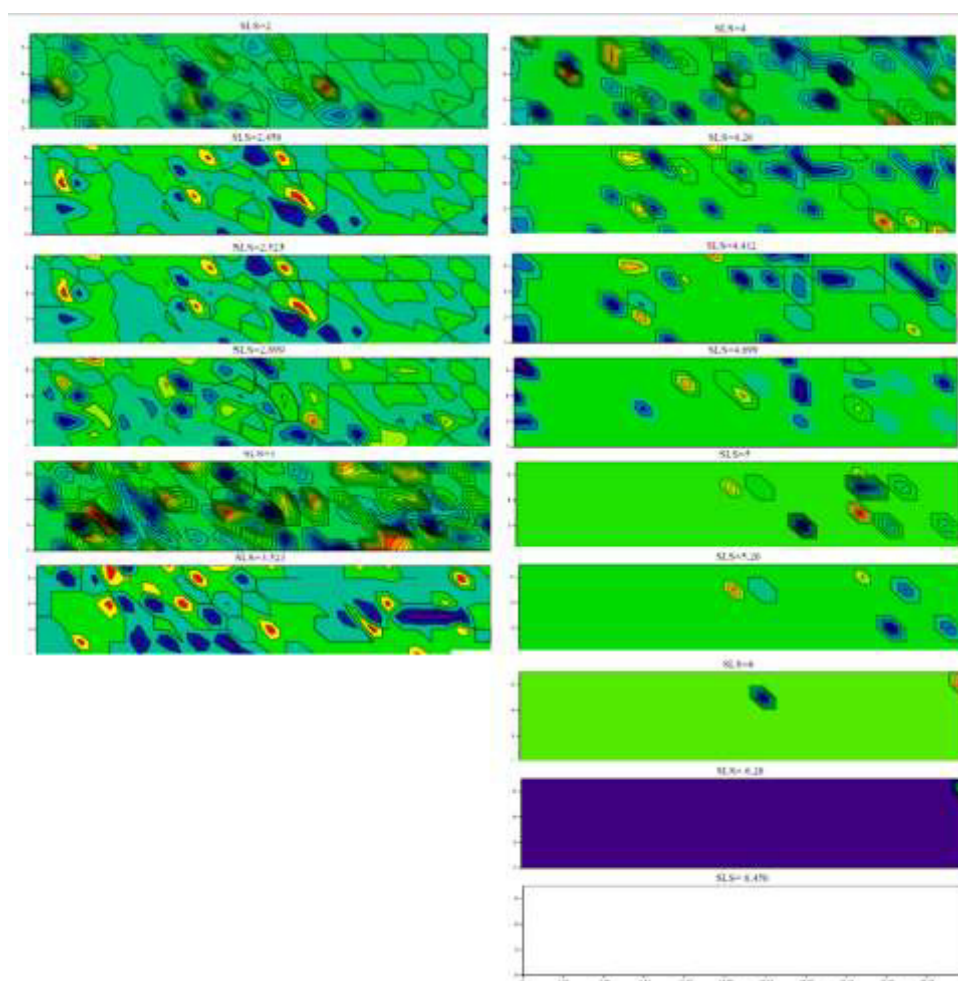


Рисунок 1 – Потенциограммы для участка №1 первого коллектора. Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации SLS [Potentiograms for section 1 of the first manifold. SLS fixation level is indicated for each potentiogram]

Результаты сканирующей контактной потенциометрии были проанализированы и сопоставлены с результатами радиографического контроля.

Распределение цветовых рефлексов на потенциограммах соответствует состоянию застывшего после расплавления металла. На большинстве участков обоих коллекторов наблюдается равномерное распределение образовавшихся концентраторов напряжений. Преимущественная окраска зеленых и светло зеленых цветов на потенциограммах характеризует однородность структуры сварного соединения по глубине. На некоторых участках наблюдается неоднородность фазового состава или наличие обширных выделений.

Для коллектора №1, участков с номерами 3-8 и 12-18 на уровнях фиксации SLS=4 – 4,432 наблюдаются рефлексы в виде протяженных широких полос синих и голубых цветов. Подобные рефлексы, как правило, связаны с особенностями технологии сварочных работ.

Для коллектора №2, участков с номерами 4-7 и 15-17 наблюдаются похожие рефлексы красно-желтых тонов.

Сравнение результатов СКП и результатов РГК показывает следующее.

На участке №14 второго коллектора наблюдается дефект сложной конфигурации, классифицируемый как частичное несплавление металлов по линии контакта. Рефлекс представляет собой фрагментированные участки, ограниченные отрезками прямых, которые располагаются на различной глубине относительно поверхности сварного соединения. Наибольшая выпуклость дефекта находится на уровне SLS=2. Некоторые фрагменты фиксируются на уровне SLS=4,432. Вероятная причина возникновения дефекта связана с отсутствием необходимой плоскопараллельности двух соприкасающихся поверхностей в этом месте (рис. 2).

Фиксация таких дефектов как отдельные поры, скопления пор, шлаковые скопления и другие, затруднены действием фона от мощных концентраторов напряжений и эффектами взаимного экранирования дефектов.

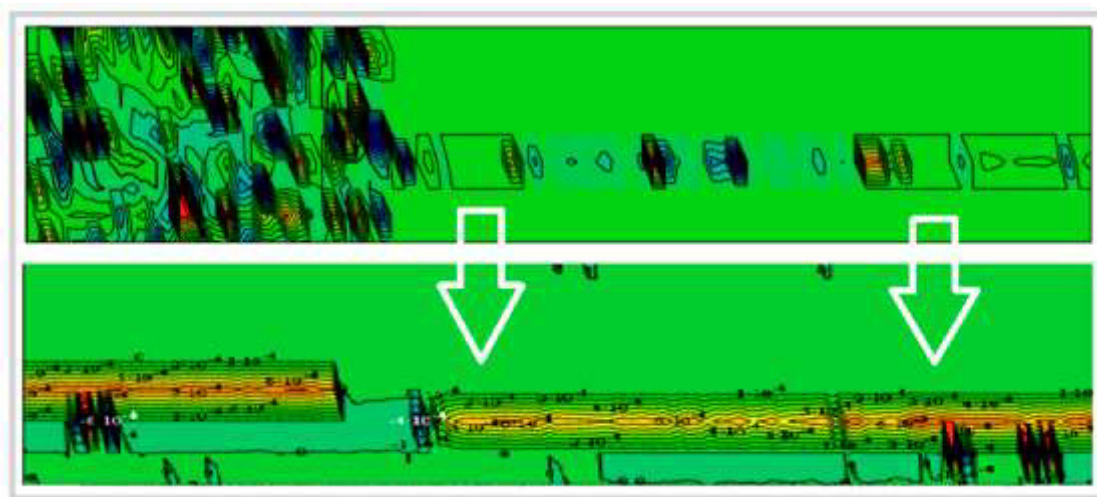


Рисунок 2 – Сравнение результата электрического НК участка №14 коллектора №2 (верхний рисунок) и результат контроля, взятого из архива данных лаборатории ФЭДНК (нижний рисунок) [Comparison of electrical NDT result of collector No.2 section No.14 (top figure) and control result taken from the FEDNC laboratory data archive (bottom figure)]

2. Коллектор пара АМ 110.05.04.000

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся коллектор пара. Контролируемым элементом являлись сварные соединения №№3-6, 3-7, 3-9 и 3-10 (рис. 3), чертеж детали АМ 110.05.04.000 СБ. Контролируемый элемент представляет собой угловое кольцевое сварное соединение. Основной металл 16ГС + Сталь 20. Сварочный материал выполнен

из сплава Св-08ГС2С. Нормативная документация, по которой выполнен радиографический контроль – ПНАЭГ-010-89, методическая документация – ПНАЭГ-7-017-89. Категория сварного соединения имеет литеру I. Тип контролируемого элемента относится к угловому сварному соединению заварки патрубка. Размеры контролируемого элемента приводятся в таблице 1. Размеры зоны электрического контроля 7,5х5,5 см. Поверхность контроля коническая.

Схема просвечивания соответствует ПНАЭ Г-7-017-89. Полная информация приводится в сборнике технологических карт. Измерение размеров выявленных несплошностей производится с помощью линейки (первичная оценка) и измерительной лупы (совокупности включений и при размерах одиночных включений по первичной оценке близких к допускаемому размеру, соответственно 3,5 и 2,5 мм) по наибольшему размеру индикаций несплошностей.

Технологическая карта электрического контроля составлена с учетом требований РГК и представлена в таблице 2.

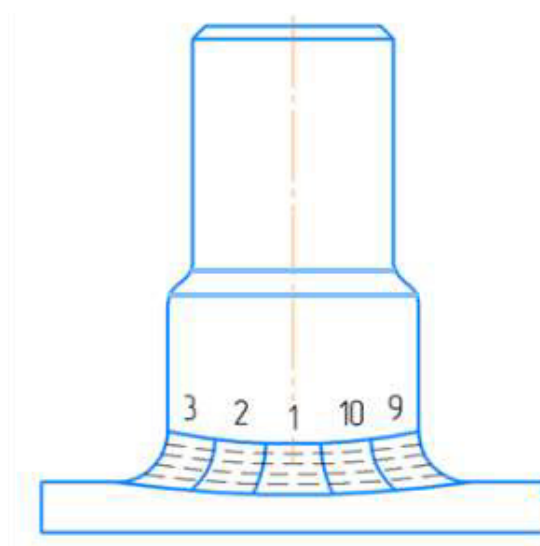


Рисунок 3 – Контролируемый элемент коллектора пара: 1-10 – участки сварного шва
[Controlled element of the steam collector: 1-10 – sections of the weld]

Таблица 1 – Размеры контролируемого элемента [Dimensions of the controlled element]

Размеры, мм	
Для изделия диаметр наружный, D	630
Для патрубка диаметр наружный, d	237
Толщина стенки, S1	25
Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ , град	0
Катеты шва по изделию, e	9±2
Катеты шва по патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
Угол разделки кромки кромки патрубка β , град	40
Усиление шва по поверхности	снято
Ширина околошовной зоны, z	3
Для изделия диаметр наружный, D	630
Для патрубка диаметр наружный, d	237
Толщина стенки, S1	25
Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ , град	0
Катеты шва по изделию, e	9±2
Катеты шва по патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
Угол разделки кромки кромки патрубка β , град	40
Усиление шва по поверхности	снято
Ширина околошовной зоны, z	3

Таблица 2 – Технологическая карта электрического контроля [Dimensions of the controlled element]

Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске				
ОМТК	Технологическая карта электрического контроля			Лист 1 Листов 5
1. Объект контроля – Коллектор пара				
1.1. Предприятие-изготовитель		Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г Волгодонске		
1.2. Контролируемое оборудование		Коллектор пара		
1.3. № чертежа				
1.4. Контролируемый элемент		Сварные соединения №№ 3-6, 3-7, 3-9 и 3-10		
1.5. Чертеж детали		Рисунок		
1.6. Тип сварного соединения		Угловое кольцевое сварное соединение		
1.7. Обозначение				
1.8. Способ сварки		10		
1.9. Основной металл		16ГС + Сталь 20		
1.10 Сварочный материал		Св-08Г2С		
1.11 Контроль		дополнительный		
2. Документация, по которой производится контроль				
2.1. Нормативная			2.2. Методическая	
3. Требования к технологии контроля и оценке качества				
3.1. Категория сварного соединения		I	3.2. Объем контроля, %	
			100	
4. Тип и размеры контролируемого элемента				
4.1. Тип контролируемого элемента		Угловое сварное соединение вварки патрубка		
4.2. Размеры, мм				
4.2.1. Для изделия: диаметр наружный, D		630	Толщина стенки, S1	25
4.2.2. Для патрубка: диаметр наружный, d		237	Толщина стенки, S	25
4.2.3. Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ, град				0
4.2.4. Катеты шва по изделию, e		9±2	патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
4.2.5. Угол разделки кромки патрубка β, град				40
4.2.6. Усиление шва по внутренней поверхности				снято
4.2.7. Ширина околошовной зоны, z				3
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске				
ОМНК	Технологическая карта электрического контроля			Лист 2 Листов 5
5. Средства контроля				
Измерительный прибор		Мультиметр Keysight 34465A 6 ^{1/2} Digit multimeter, зав. № MY 59007727		
Способ контроля		Ручной, точечный		
Измеряемая величина		Контактная разность потенциалов		
Материал преобразователя		12X18H10T		
Диаметр наконечника датчика, мм		2,5		
Предел измерений, В		0,01		
Накладка трафаретная		Сетка пластиковая штукатурная с размером ячейки 3x3 мм		
Расположение второго электрического контакта		На поверхности изделия		
Сила прижатия преобразователя к поверхности контроля, Н, не более				0,5
Угол наклона оси датчика к поверхности контроля, град				80-90
Шаг сканирования, мм				3
Условная плотность точек контроля				14x22
Шероховатость поверхности, мкм, не хуже				Rz 40
6. Схема и параметры контроля				
6.1. Схема электрического контроля – методическая				
		Установить на контролируемом участке трафарет и закрепить его на поверхности клеющимися прижимами. С каждой стороны трафарет должен выходить за пределы контролируемого участка на 5-7 мм. По трафарету определить число точек контроля в двух взаимно перпендикулярных направлениях (x и y).		

Продолжение таблицы 2

		Ручное поточечное сканирование проводится вдоль горизонтальных измерительных дорожек «слева направо» в направлении «снизу вверх» поочередно в каждой клетке трафарета.
6.2. Число контролируемых участков		10
7. Подготовка контролируемого элемента		
7.1. Требования к качеству поверхности	Подлежащее контролю сварное соединение должно быть очищено от окалины, шлака, брызг металла и других загрязнений, и обезжирено растворителем. Также должны быть устранены все обнаруженные при внешнем осмотре наружные дефекты, а также неровности, рефлекс от которых на потенциограмме могут помешать выявлению и расшифровке изображений внутренних несплошностей сварного соединения.	
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске		
ОНМК	Технологическая карта электрического контроля	Лист 3 Листов 5
7.2. Разметка на участки	Контролируемое сварное соединение должно быть размечено на 10 участков и выделена контролируемая зона	
8. Условия и порядок проведения контроля		
8.1. Место проведения контроля	На территории завода	
8.2. Состав рабочего звена	Два дефектоскописта, один из которых должен иметь квалификацию с правом выдачи заключения	
8.3. Диапазон рабочих температур	+10 ÷ +30	
8.4. Последовательность технологических операций:		
8.4.1. Согласно п. 6.1. закрепить на контролируемой поверхности трафарет. Маркировка участка контроля должна содержать следующую информацию: - номер заключения; - заводской номер изделия; - маркировку контролируемого элемента; - номер участка; - шифр дефектоскописта.		
8.4.2. Включить информационно-измерительную систему на прогрев в течение 30 минут		
8.4.3. Произвести необходимые действия на компьютере для сохранения измерительной информации		
8.4.4. Произвести ручное сканирование поверхности контроля		
8.4.5. По окончании сканирования снять трафарет и укрепить его на следующем участке контроля		
8.4.6. Повторить операции по пп. 8.4.3. и 8.4.4.		
8.4.7. Выполнить обработку результатов контроля в соответствии с методическими указаниями		
9. Расшифровка потенциограмм		
9.1. С помощью программы обработки результатов построить и расшифровать потенциограммы		
9.2. Расшифровка потенциограмм производится на разных структурных уровнях сигнала SLS: от значения 2 до значения 6 в соответствии с методическими указаниями		
9.3. Потенциограммы, построенные для каждого структурного уровня, собираются в один общий рисунок		
9.4. Зона расшифровки ограничивается размером трафарета и условной плотностью точек контроля		
9.5. На потенциограммах произвести отбор выявленных несплошностей, полученных другими методами неразрушающего контроля		
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске		
ОНМК	Технологическая карта электрического контроля	Лист 4 Листов 5
9.6. Измерение размеров выявленных несплошностей производить с помощью компьютерной программы обработки результатов		
9.7. Измеренные при расшифровке потенциограмм размеры следует округлить до ближайших значений рекомендуемого ряда		

Продолжение таблицы 2

продолжение таблицы 2

10. Оценка качества						
10.1. Качество сварного соединения считается удовлетворительным, если на потенциограммах не будут зафиксированы трещины и непровары, а также включения недопустимых размеров						
10.2. Нормы допустимых одиночных включений и скоплений следует принимать для расчетной высоты углового шва (согласно АМ 110.05.04.000 ТБ2) – 26 мм:						
Одиночные включения и скопления*				Одиночные крупные включения		
Допускаемый наибольший размер		Допускаемое число включений и скоплений на любом участке сварного соединения длиной 100 мм	Допускаемая суммарная приведенная площадь включений и скоплений на любом участке сварного соединения, длиной 100 мм, мм ²	Допускаемые		Допускаемое число на любом участке сварного соединения длиной 100 мм
включения, мм	скопления, мм					
2,5	3,5	15	20,0	5,0	2,5	2
*- при определении скопления учитываются любые включения, наибольший размер которых превышает 0,2 мм						
10.3. Выявленные включения, наибольший размер которых менее 0,4 мм при оценке качества сварных соединений не учитываются как при подсчете количества включений и их суммарной приведенной площади, так и при рассмотрении расстояний между включениями (скоплениями).						
10.4. Любую совокупность включений (одиночных скоплений, групп включений), которая может быть вписана в прямоугольник с размерами сторон, не превышающим 5,0×2,5 мм или квадрат с размером стороны, не превышающим 2,5 мм, допускается рассматривать как одно сплошное включение.						
10.5. При отсутствии одиночных крупных включений (в том числе принимаемых за указанные включения по п. 10.4) или при их количестве, менее допускаемого по нормам таблицы 10.2., вместо них могут быть допущены в соответствующем количестве одиночные включения и/или одиночные скопления допускаемых размеров без их учета при подсчете суммарной площади одиночных включений и одиночных скоплений.						
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске						
ОНМК		Технологическая карта электрического контроля			Лист 5 Листов 5	
10.6. Результаты оценки допустимости по пп. 10.1-10.5 и выводы о качестве контролируемого элемента занести в рабочий журнал и заключение. При обнаружении несплошностей, подлежащих исправлению, сообщить изготовителю.						

Все дефекты, обнаруженные на пленках РГК, идентифицированы и сопоставлены с результатами электрического контроля, представленными на потенциограммах.

Для сварного соединения №3-6 в центральной части второго участка на уровне фиксации SLS=4,26 присутствует шестиугольный рефлекс, идентифицируемый как одиночная пора. Центральная часть рефлекса (на потенциограмме красная точка), соответствующая наибольшему значению амплитуды сигнала контроля, имеет диаметр 2-3 мм (рис. 4).

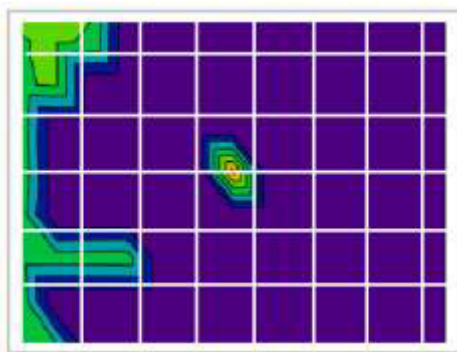


Рисунок 4 – Рефлекс от одиночной поры в центре участка контроля. Размер сетки 1x1 см. Участок №2 [Reflex from a single pore in the center of the control area. The size of the grid is 1x1 cm. Site No.2]

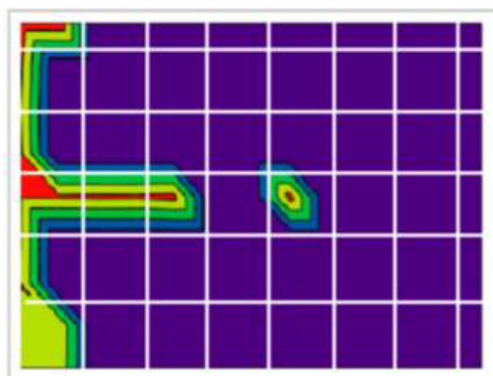


Рисунок 5 – Непровар с левой стороны рисунка. Длина дефекта 15-20 мм. Участок №3. Сравнение результата на потенциограмме (слева) и фрагмент непровара на рентгеновской пленке (справа) [Failure on the left side of the pattern. The length of the defect is 15-20 mm. Site No.3. Comparison of the result on the potentiogram (left) and a fragment of the failure on the X-ray film (right)]

На третьем участке, вдоль линии сопряжения двух свариваемых поверхностей, идентифицирован протяженный дефект «непровар». Длина дефекта 15-20 мм, ширина – 1 мм (рис. 5).

На четвертом участке, в нижней части, идентифицирован протяженный дефект «непровар». Длина дефекта 15 мм, ширина – 1 мм (рис. 6).

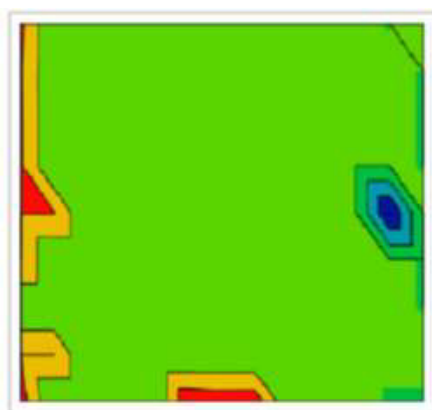


Рисунок 6 – Непровар на уровне фиксации SLS=4. Длина дефекта 10-15 мм. Участок №4 [Failure at the fixation level SLS=4. Length of the defect is 10-15 mm. Site No.4]

На седьмом участке идентифицирована пора диаметром 2 мм.

На восьмом участке идентифицирован непровар, в нижней части участка контроля (рис. 7, SLS=4).

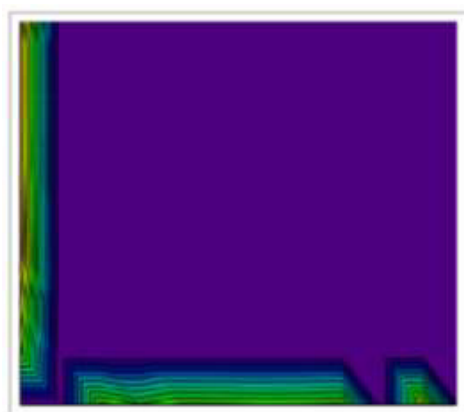


Рисунок 7 – Непровар. Участок №8 [Failure to brew. Site No.8]

На девятом и десятом участках идентифицированы поры.

На участке №5, начиная с SLS=4,26, в нижней части потенциограммы видна темная продольная полоса, длиной 50 мм и шириной менее 1 мм.

Для сварного соединения №3-7 в верхней части первого участка на уровне фиксации SLS=3 идентифицировано шлаковое скопление C5Ш3x1 (рис. 8).

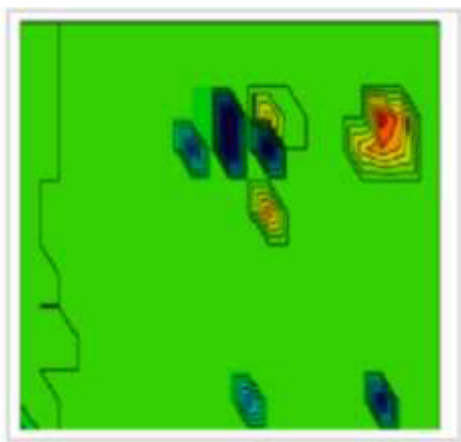


Рисунок 8 – Шлаковое скопление C5Ш3x1. Участок №1 [Slag cluster C5Sh3x1. Site No.1]

Шлаковые скопления и поры идентифицированы также и на других участках этого сварного соединения:

- участок №2 C5Ш1,5x0,5 (рис. 9);
- участок №3 C5Ш1,5x0,5;
- участок №4 Ш2x0,8;
- участок №5 П0,5;
- участок №6 П0,3;
- участок №10 C5Ш2x1,5.

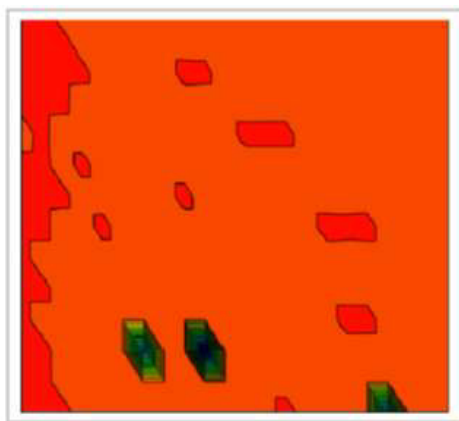


Рисунок 9 – Шлаковое скопление C5Ш1,5x0,5. Участок №2 [Slag accumulation C5Sh1,5x0,5. Site No.2]

Для сварного соединения №3-9 идентифицированы следующие шлаковые скопления и скопления пор:

- участок №1 C5Ш1,5x1;
- участок №2 C10Ш1,5x1,2;
- участок №3 П1,2; П0,8; C5П1,0; C7П1,0; П1,5 (рис. 10);
- участок №4 C7П0,6; Ш1,2x1; П0,6;
- участок №5 2П1,2; П1,0;
- участок №6 C10П1,5; П1,2;
- участок №9 C12Ш2,5x1,2.

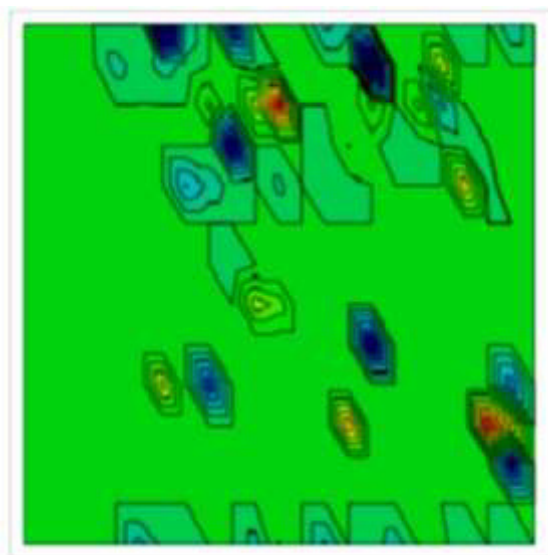


Рисунок 10 – Поры и скопления пор П1,2; П0,8; С5П1,0; С7П1,0; П1, Участок №3 [Pores and pore clusters P1.2; P0.8; C5P1.0; C7P1.0; P1, Site No. 3]

Комплексное протяженное скопление С15Ш5х1,2; П2; П1,5; П0,6; С10П1,2; С7Ш3х2 идентифицировано на участке №8 и уровне фиксации SLS=3 (рис. 11).

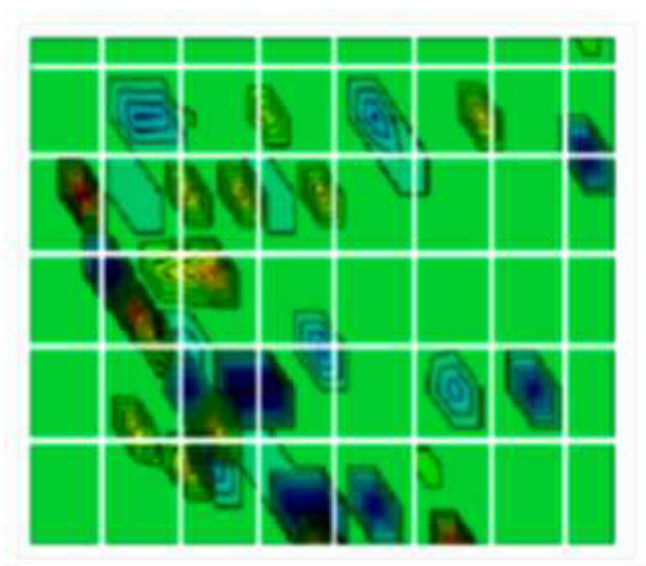


Рисунок 11 – Комплексное протяженное скопление С15Ш5х1,2; П2; П1,5; П0,6; С10П1,2; С7Ш3х2 на участке №8. Уровень фиксации SLS=3 [Complex extended cluster C15Sh5x1.2; P2; P1.5; P0.6; C10P1.2; C7Sh3x2 at site No.8. Fixation level SLS=3]

Для сварного соединения №3-10 идентифицированы шлаковое скопление и отдельные поры на следующих участках:

- участок №1 П;
- участок №2 П;
- участок №3 П;
- участок №4 С12Ш3х1,5 (рис. 12);
- участок №6 П;
- участок №7 П;
- участок №10 П.

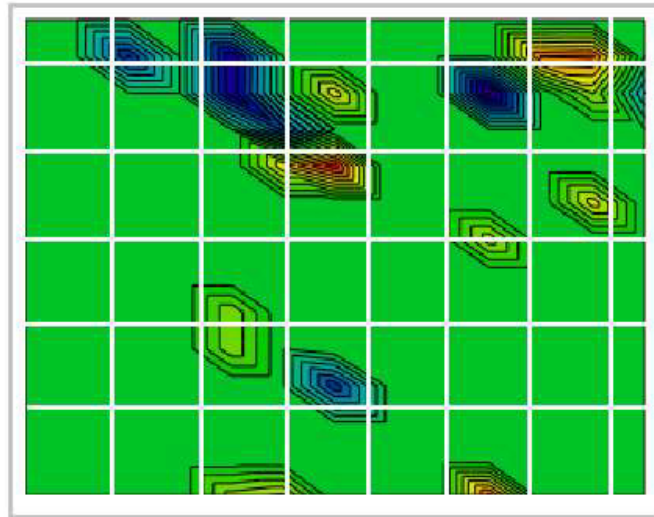


Рисунок 12 – Протяженное шлаковое скопление С12Ш3х1,5 на участке №4. Уровень фиксации SLS=3[Extended slag accumulation C12Sh3x1.5 in section No.4. Fixation level SLS=3]

3. Клапан обратный АИЦН1218.1400.160302

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся клапан обратный. Контролируемыми элементами являлись два выбранных участка на внешней поверхности клапана, которые представляют собой цилиндрические поверхности. Размер зоны контроля составляет 111,5х34,5 см. Объект контроля изготовлен литьем. Толщина стенки контроля 14,5 см. На поверхности видны многочисленные пятна коррозии размерами 1-5 мм.

Результаты электрического контроля представлены на потенциограммах (рис. 13 и 14).

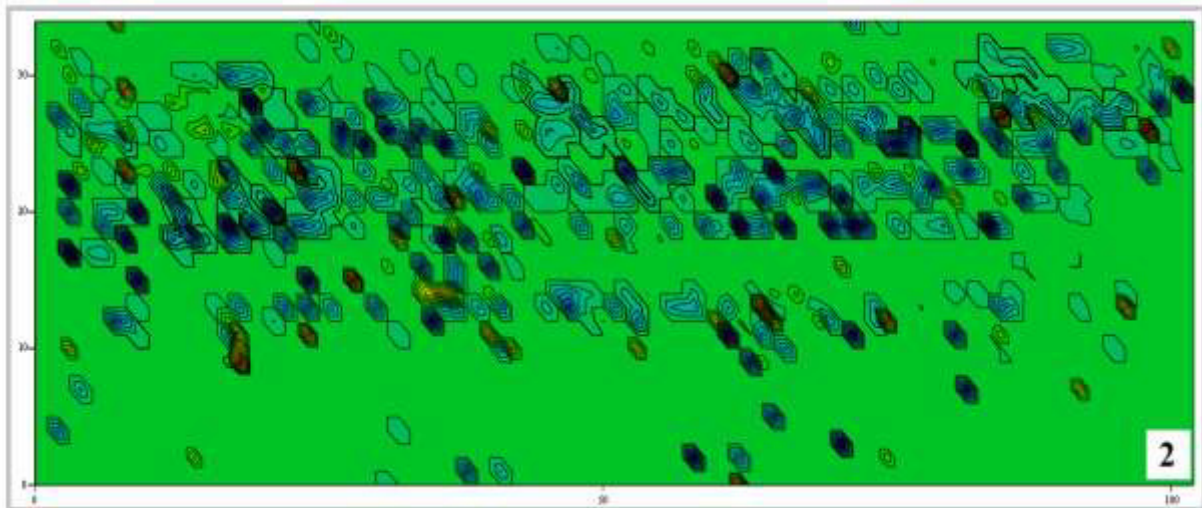


Рисунок 13 – Клапан обратный. Участок №1. Уровень фиксации SLS=2[Check valve. Site No. 1. Locking level SLS=2]

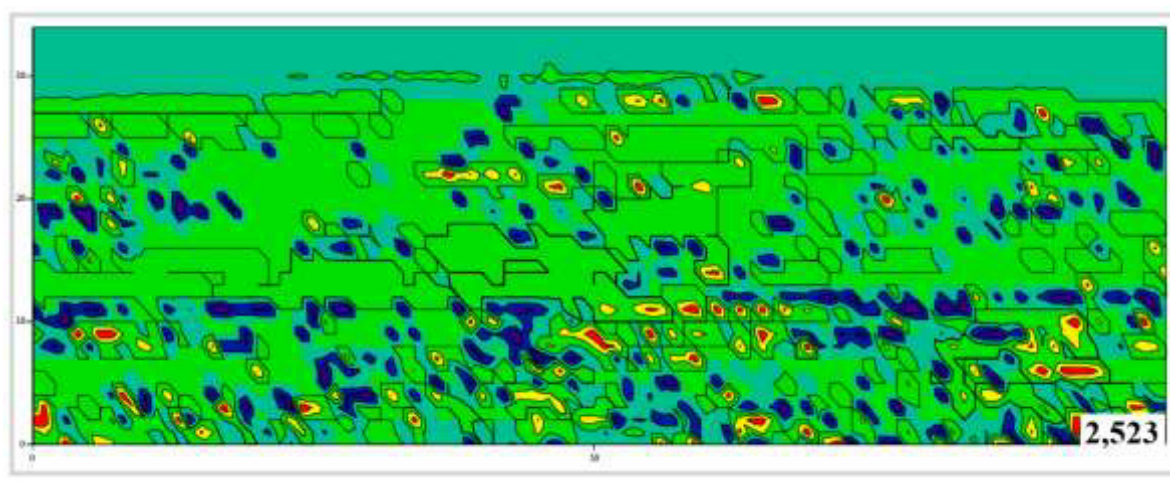


Рисунок 14 – Клапан обратный. Участок №2. Уровень фиксации SLS=2,523 [Check valve. Site No.2. Fixation level SLS=2.523]

Для первого участка на уровнях фиксации SLS=2-3 видны многочисленные подповерхностные дефекты. Дефекты имеют форму простых геометрических фигур (треугольников, многоугольников), их разнообразные сочетания, а также фигуры неправильной формы. На низких уровнях фиксации видны также контуры протяженных рефлексов, ограниченных замкнутыми тонкими линиями. Указанные рефлексy имеют вид отдельных полосовых фигур и хорошо видны на уровнях фиксации SLS=4 и 4,26. На уровне фиксации SLS=4,699 обнаружен протяженный рефлекс, имеющий отношение к внутренней протяженной полости или образованной каверне.

Аналогичные виды рефлексов наблюдаются и на втором участке контроля. Рефлексy в виде ограниченных полосовых структур здесь также имеют место на уровнях фиксации SLS=4 и 4,26, что может быть причиной имеющегося значительного протяженного дефекта в целом слое металла.

4. Труба с наплавкой И, №5, АМ 117.03.02.540

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлась труба с наплавкой И №5 (рис. 15). Особенностью контроля трубы с наплавкой И было применение двойного поверхностного сканирования участков №10 и №11. Контролируемый элемент представляет собой цилиндрическую поверхность со скошенным торцом. Толщина наплавки 25 мм, высота 22 мм. Условная плотность точек электрического контроля для цилиндрической поверхности 10x26, для торцевой поверхности – 16x30.

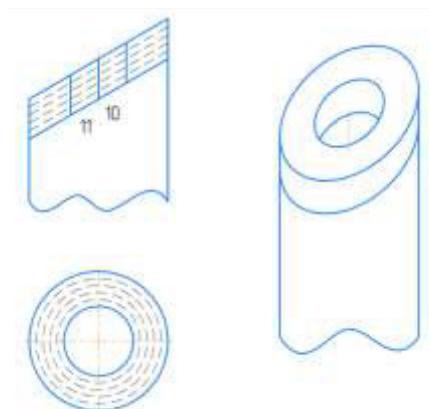


Рисунок 15 – Эскиз трубы с наплавкой И АМ 117.03.02.540 [Sketch of a tube with cladding AND AM 117.03.02.540]

Результаты электрического контроля трубы с наплавкой для участка №11 представлены на потенциограммах (рис. 16 и 17).

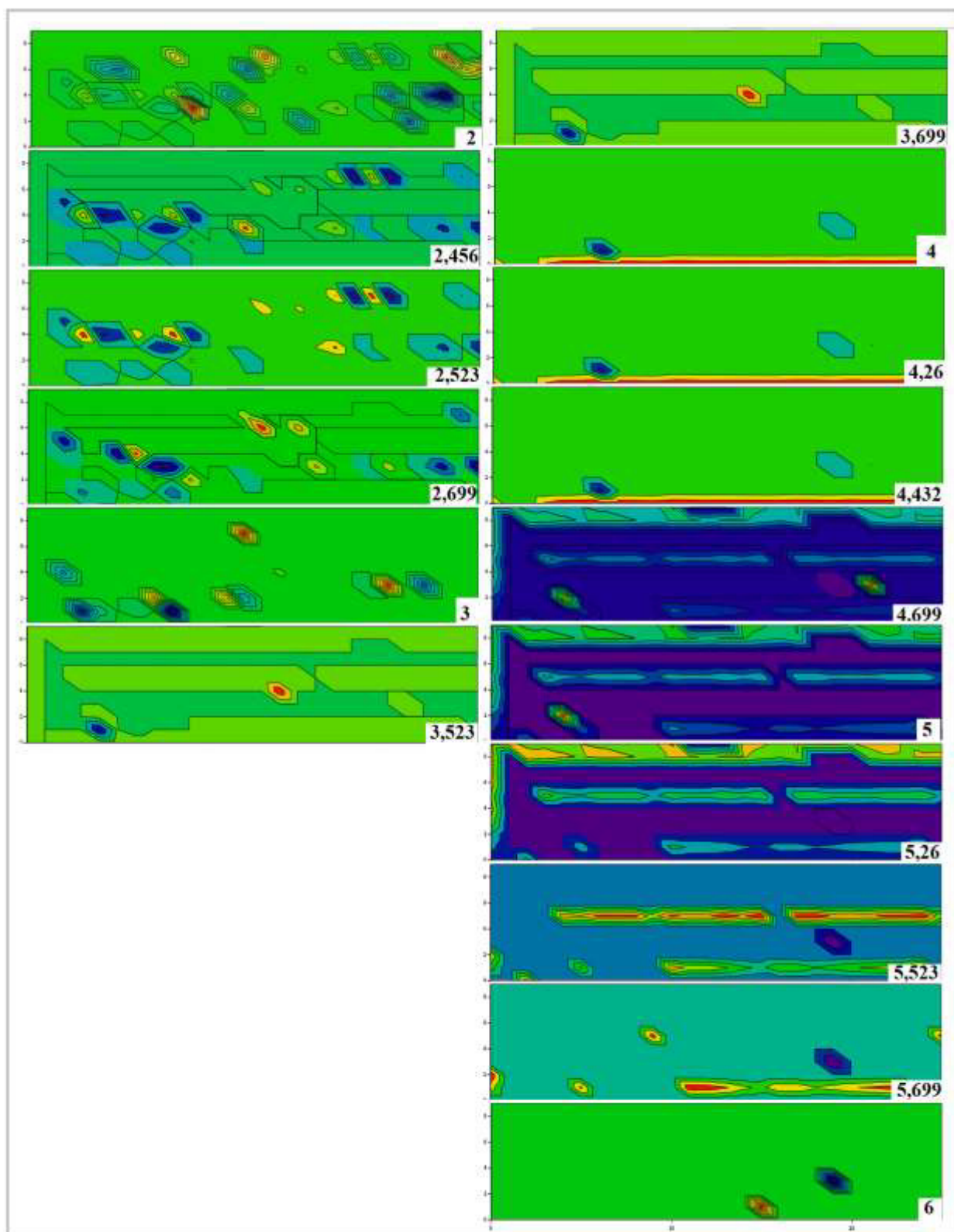


Рисунок 16 – Потенциограммы для участка №11 трубы с наплавкой (сканирование по цилиндрической поверхности). Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации [Potentiograms for section No.11 of the cladding pipe (cylindrical surface scan). The level of fixation is indicated for each potentiogram]

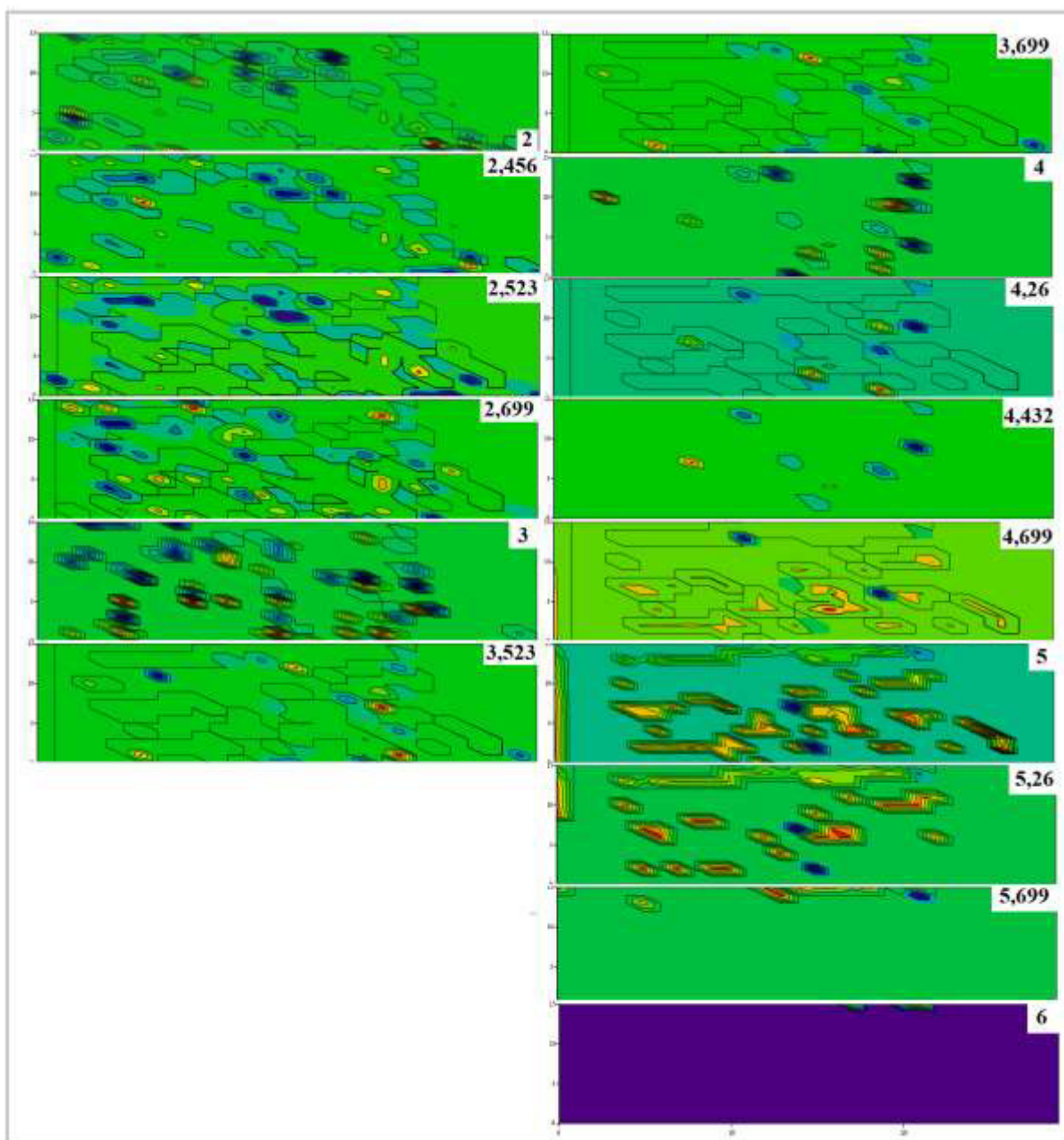


Рисунок 17 – Потенциограммы для участка №11 трубы с наплавкой (сканирование с торца). Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации [Potentiograms for the cladding section No.11 of the pipe (scanning from the end). The level of fixation is indicated for each potentiogram]

При контроле по цилиндрической поверхности контуры дефектов с малой мощностью хорошо видны на уровне фиксации SLS=3,523. Точные координаты этих дефектов можно определить на высоком уровне фиксации SLS=5,699.

На участке №11 в нижней части наплавки на уровне фиксации SLS=4 видна тонкая полоса непровара. Структура дефекта, его отдельные части, хорошо видны на уровне фиксации SLS=5,523 и 5,699, а также на потенциограмме при торцевом контроле.

Следует отметить одно существенное преимущество представления результатов метода СКП по сравнению с представлением результатов методом РГК. Результаты на рентгеновской пленке отображаются в плоскости, а на потенциограмме можно получить распределение дефектов в объеме изделия (рис. 18). Возможен двойной или

двусторонний РГК объекта контроля, но это гораздо сложнее реализовать практически, чем двойное сканирование поверхностей методом СКП.

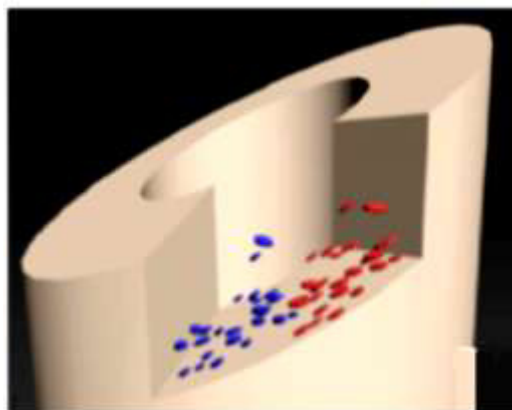


Рисунок 18 – Распределения дефектов в объеме наплавки на участках №10 и №11 выделены различными цветами [Distributions of defects in the cladding volume at sections 10 and 11 are highlighted in different colors]

Применение же двух независимых методов контроля СКП и РГК дает возможность с высокой точностью и надежностью определить координаты и глубину залегания дефектов, для этого необходима точная привязка по координатам для двух указанных методов НК.

Заключение

1. Проведено совместное научное исследование метода сканирующей контактной потенциометрии представителями НИЯУ МИФИ и сотрудниками ОНМК Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск в лабораторных и заводских условиях и получен необходимый объем практических результатов, доказывающих высокую эффективность и надежность разработанного метода НК.

2. В заводских условиях продемонстрированы функциональные возможности выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов электрическим методом НК непосредственно в процессе производства реакторного оборудования. Измерения выполнены на подготовленных образцах оборудования следующих наименований:

- парогенератор ПГВ-1000М, №10, сварные соединения №111 для обоих коллекторов;
- коллектор пара, чертеж детали АМ110.05.04.000, №10. Сварные швы №3-6, №3-7, №3-9 и №3-10;
- клапан обратный АИЦН1218.1400.160302;
- труба с наплавкой И, №5, АМ 117.03.02.540.

3. Полученные результаты подтверждают высокую надежность и преимущества выявления дефектов в сварных соединениях и других объектах контроля электрическим методом НК. Результаты электрического НК были сопоставлены с результатами УЗК и РГК для всех исследованных объектов контроля и показали адекватное соответствие.

4. В ходе выполнения совместной исследовательской работы были разработаны измерительные методики и проекты технологических карт электрического неразрушающего контроля. Определены необходимые условия и приняты меры по созданию информационно-измерительной системы и измерительных устройств электрического контроля для практической реализации метода СКП на площадке Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск.

5. В качестве пилотного проекта по внедрению электрического метода рекомендуется организовать на площадке Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск в ОМНК группу электрического неразрушающего контроля. Обучить дефектоскопистов и обеспечить отдел необходимой аппаратурой электрического НК.

6. Адаптация измерительных средств и методик электрического контроля для производственных условий позволит выполнять текущий контроль технического состояния объектов без вывода их из эксплуатации. Следует подчеркнуть, что в настоящее время метод СКП является единственным безальтернативным измерительным средством с точки зрения возможностей и оперативной реализации, а также объема и надежности получаемой информации о материалах и изделиях внутри активной зоны работающего реактора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сурин, В.И. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях / В.И. Сурин, В.И. Польский, А.В. Осинцев, П.С. Джумаев // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 53-60.
2. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования / В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4(21). – С. 51-62.
3. Отчет о НИОКТР. Электрофизический неразрушающий контроль сварных швов парогенератора ПГВ 1000 в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке «АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске / В.Г. Бекетов, А.Е. Дембицкий, В.В. Кондаков, [и др.] // Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ, 2017, рег. № АААА-А19-119032190046-8. – 118 с.
4. Mupati O., Sahu S., Pal S.K., Srirangam P. An investigation of mechanical and electrical properties of friction stir welded Al and Cu for battery pack application // Materials chemistry and physics, 287, 2022, 126373, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126373>.
5. Chuan J., Wenbiao G., Wei L., Fan J., Wenquan W. Microstructure and mechanical/conductivity properties of pure copper joint welded by friction stir welding // China welding, 2020. Vol. 29. № 3. P. 26-32.
6. Electrical conductivity field analysis for evaluation of FSW joints in AA6013 and AA7075 alloys // Journal of Materials Processing Technology, <https://www.researchgate.net/publication/251609849>.
7. Bermejo M.A.V, Hurtig K., Eyzor D., Karlsson L. A new approach to the study of multi-pass-welds-microstructure and properties of welded 20-mm-thick superduplex stainless steel // Appl. Sci., 2019. Vol. 9, P.1050.
8. Tomkow J., Janeczek A. Underwater in situ local heat treatment by additional stitches for improving the weldability of steel // Appl. Sci., 2020. V.10, P.1823.
9. Ушаков, В.М. К вопросу чувствительности ультразвукового контроля сварных соединений объектов энергетики / В.М. Ушаков, В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 2019. – № 10. – С. 3-13.
10. Ключев, В.В. Теория и практика радиационного контроля / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин. – Москва : Машиностроение, 1998. – 170 с.
11. Зуев, В.М. Радиографический контроль сварных соединений/ В.М. Зуев, Р.Л. Табакман, Ю.И. Удралов. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2001. – 143 с.
12. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 19 с.

REFERENCES

- [1] Surin V.I. Primenenie metoda skaniruyushchej kontaktnoj potenciometrii dlya registracii obrazovaniya zarodyshevoj treshchiny v stalyah [Application of Scanning Contact Potentiometry for Nucleation Cracking in Steels], Defektoskopiya [Defectoscopy], 2019, No. 1, pp. 53-60 (in Russian).
- [2] Surin V.I., Volkova Z.S. Metody elektrofizicheskoy diagnostiki i kontrolya reaktornogo oborudovaniya [Methods of Electrophysical Diagnostics and Control of Reactor Equipment], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2016, no. 4(21), pp. 51-62 (in Russian).
- [3] Otchet o NIOKTR. Elektrofizicheskij nerazrushayushchij kontrol' svarnyh shvov parogeneratora PGV 1000 v Resursnom centre NIYAU MIFI na ploshchadke «AEM-tekhologii «Atomash» v g. Volgodonske [Research and Development Report. Electrophysical Non-Destructive Inspection of PGV 1000 Steam Generator Welds at the MEFPI Resource Centre at the Atomash AEM-

- technologies site in Volgodonsk], Otechet o NIOKTR, NIYAU MIFI, 2017, registracionnyj nomer AAAA-A19-119032190046-8 [Research and Development Report, NRNU MEPhI, 2017, registration number AAAA-A19-119032190046-8], 118 p. (in Russian).
- [4] Mypati O., Sahu S., Pal S.K., Srirangam P. An Investigation of Mechanical and Electrical Properties of Friction Stir Welded Al and Cu for Battery Pack Application // *Materials Chemistry and Physics*, 287, 2022, 126373, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126373> (in English).
 - [5] Chuan J., Wenbiao G., Wei L., Fan J., Wenquan W. Microstructure and Mechanical/Conductivity Properties of Pure Copper Joint Welded by Friction Stir Welding // *China Welding*, 2020, Vol. 29, № 3, p. 26-32 (in English).
 - [6] Electrical Conductivity Field Analysis for Evaluation of FSW Joints in AA6013 and AA7075 Alloys // *Journal of Materials Processing Technology*, <https://www.researchgate.net/publication/251609849> (in English).
 - [7] Bermejo M.A.V., Hurtig K., Eyzor D., Karlsson L. A New Approach to the Study of Multi-Pass-Welds-Microstructure and Properties of Welded 20-mm-thick Superduplex Stainless Steel // *Appl. Sci.*, 2019, Vol. 9, pp.1050 (in English).
 - [8] Tomkow J., Janeczko A. Underwater in Situ Local Heat Treatment by Additional Stitches for Improving the Weldability of Steel // *Appl. Sci.*, 2020, V. 10, P.1823 (in English).
 - [9] Ushakov V.M. K voprosu chuvstvitel'nosti ul'trazvukovogo kontrolya svarnyh soedinenij ob"ektov energetiki [Sensitivity of Ultrasonic Testing of Welded Joints of Power Engineering Facilities], *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2019, no.10, pp. 3-13 (in Russian).
 - [10] Klyuev, V.V. Teoriya i praktika radiacionnogo kontrolya [Theory and Practice of Radiation Control] Moskva: Mashinostroenie [Moscow: Mechanical Engineering], 1998, 170 p. (in Russian).
 - [11] Zuev, V.M. Radiograficheskij kontrol' svarnyh soedinenij [Radiographic Inspection of Welded Joints]. St. Petersburg: Energoatomizdat, 143 p. (in Russian).
 - [12] GOST 751-82. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Radiograficheskij metod [State Standard 7512-82. Non-Destructive Testing. Welded Joints. Radiographic Method]. Moscow: Standartinform, 2008, 19 p. (in Russian).

Justification of Scanning Contact Potentiometry Applicability to Test NPP Equipment during its Manufacture

© 2023 Vitaly I. Surin¹, Alexander S. Shcherban², Alexander A. Shcherbakov³,
Maxim E. Zhidkov⁴, Sergey A. Tomilin⁵, Mikhail B. Ivanyi⁶

^{1,3,6}National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoyeshosse, 31, Moscow, Russia 1154091
^{2,4}«Atomash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Zhukovskoe highway, 10, Rostov region, Russia, 347360

⁵Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹VISurin@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-6153-0206

²shcherban_as@atomash.ru

³AAScherbakov@mephi.ru

⁴zhidkov_me@atomash.ru

⁵SATomilin@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-8661-8386

⁶MBIvanii@mephi.ru

Поступила в редакцию 11/30/2022

После доработки 02/08/2023

Принята к публикации 02/21/2023

Abstract. The method of scanning contact potentiometry (SCP) was investigated in factory conditions and functional capabilities of electric non-destructive testing (NDT) method to detect structural heterogeneities and technological defects were demonstrated directly in the process of reactor equipment production.

Keywords: electrical non-destructive testing, scanning contact potentiometry method, technical diagnostics and non-destructive testing of reactor equipment.

For citation: Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Ivanyi M.B. Justification of Scanning Contact Potentiometry Applicability to Test NPP Equipment During its Manufacture // *Global Nuclear Safety*. 2023. No. 1(46). P. 36-53 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>.