

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.53: 620.179.118 (075)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА
ВТОРОГО КОНТУРА МАШИННОГО ЗАЛА МЕТОДОМ
СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ

© 2021 А.К. Адаменков*, М.И. Малахов**, В.Д. Ожерельев*, В.И. Сурин***

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск,
Ростовская обл., Россия

**Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

***Национальный исследовательский ядерный университет НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Проведены испытания электрофизической системы неразрушающего контроля на действующем технологическом оборудовании АЭС. Объектом контроля выбраны сварные соединения технологического трубопровода, находящиеся в машинном зале (МЗ-1) ТО-1. Результатами проведенного исследования подтверждается, что основной металл сварных соединений находится в пластически деформированном состоянии. Приводится сравнение результатов контроля сварных соединений методами сканирующей контактной потенциометрии и магнитной анизотропии.

Ключевые слова: метод сканирующей контактной потенциометрии, неразрушающий контроль сварных соединений, метод магнитной анизотропии.

Поступила в редакцию 10.11.2020

После доработки 21.12.2020

Принята к печати 28.12.2020

Принцип обнаружения структурной неоднородности методом сканирующей контактной потенциометрии (СКП) основан на регистрации скачка разности электрических потенциалов на поверхности контролируемого объекта в случае излучения структурной неоднородностью волн механических напряжений.

Выделение энергии упругой деформации происходит при различных дислокационных процессах, а также в результате разрыва сплошности среды. Нестационарный процесс перестройки поля упругих напряжений происходит с конечной скоростью, близкой к скорости распространения продольной волны. Длительность процесса излучения волн механических напряжений (отдельного акустического импульса) измеряется единицами микросекунд, а амплитуда механических смещений может достигать значений порядка нескольких миллиметров [1].

Рост дефекта, особенно в условиях, когда его размеры приближаются к критическому значению, сопровождается усилением интенсивности волн механических напряжений, что значительно увеличивает вероятность обнаружения дефекта электрофизическим датчиком.

Например, при исследовании деформационно-упрочненной вольфрам-рениевой проволоки методом контактной потенциометрии в процессе статического растяжения в момент ее разрыва был слышен достаточно громкий звук низкой частоты. Амплитуда сигнала, зарегистрированная электрофизическим датчиком в момент разрыва проволоки, достигала значения десятых единиц вольта [2].

Основными преимуществами методов контактной потенциометрии являются:

– возможность обнаружения как развивающихся, так и квазиустойчивых во времени (не растущих) дефектов. Регистрация квазиустойчивых дефектов позволяет классифицировать их по размерам (или по другим косвенным признакам – форме, положению, ориентации). Регистрация развивающихся дефектов дает возможность их оценки по степени опасности (влияние на эксплуатационную надежность конструкции);

– высокая степень адаптации к условиям эксплуатации, что отвечает требованиям функциональной диагностики. Линейные размеры преобразователей могут быть достаточно малыми, менее одного миллиметра в диаметре, поэтому требуется незначительный физический объем для их размещения. Средства контактной потенциометрии используются в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе в активной зоне ядерного реактора [3, стр. 80-85; 4];

– высокая производительность, равная, а иногда превосходящая производительность других методов неразрушающего контроля;

– высокое соотношение «эффективность-стоимость». При имеющихся технических возможностях стоимость измерительных средств контактной потенциометрии, примерно, в два-три раза ниже, чем для методов УЗК и акустической эмиссии. Датчики контактной потенциометрии независимы от источников проводного электропитания.

Цель работы: испытания электрофизической системы неразрушающего контроля на действующем технологическом оборудовании АЭС и получение первых экспериментальных результатов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА ВТОРОГО КОНТУРА

Подготовка сварных соединений для измерений

Исследование сварных соединений методом СКП проводилось в турбинном отделении (ТО-1) первого энергоблока (ЭБ-1) Ростовской атомной станции (РоАЭС).

Объектом диагностирования были выбраны сварные соединения (СС) технологического трубопровода, находящиеся в машинном зале (МЗ-1) ТО-1. Персоналом отдела дефектоскопии металла и технологического контроля были предоставлены сварные соединения, одно из которых было выполнено заводом-изготовителем трубопровода (СС_1; находящееся на конденсатопроводе отборов из цилиндра низкого давления), второе было выполнено специалистом по сварке (СС_2; находящееся на трубопроводе подачи дренажа из подогревателя низкого давления (ПНД-3) в тракт основного конденсата).

Перед проведением измерений сварные соединения были открыты от теплоизоляции, сварные швы были очищены от лакокрасочных материалов и корродирующей составляющей до металлического блеска (рис. 1). Два выбранных для опытно-экспериментального исследования сварных соединения были подготовлены для сканирующей контактной потенциометрии. С двух сторон, для СС_1 и с одной для СС_2, по окружности трубы были закреплены бумажные полосы (разметка) шириной 2 см с нанесенными делениями и ценой деления 2 мм. Шаг измерений для СС_1 составляла 2 мм, для СС_2 – 5 мм. Ширина СС_1 составляли 1,5 см, СС_2 – 1 см. По длине окружности ширина шва могла отличаться от указанных значений на 2-5 мм. Диаметры трубопроводов: конденсатопровод отборов из ЦНД $Dy=500-600$ мм, трубопровод подачи дренажа из ПНД-3 в тракт основного конденсата $Dy=300$ мм.



Рисунок 1 – Поверхность сварного соединения СС_1 перед проведением электрофизических измерений
[The surface of the welded joint СС_1 before carrying out electrophysical measurements]

Методика измерений контактной разности потенциалов

Измерения контактной разности потенциалов были выполнены ручным поточечным сканированием с помощью программно-аппаратного комплекса мобильной диагностической системы, размещенной на ноутбуке *Asus X554L* [5]. Для обработки результатов контроля использовался программируемый амплитудный дискриминатор (ПАД) измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 40 дБ [6]. Назначение дискриминатора заключается в отсечке тех значений амплитуды сигнала, которые выше выбранного заданного уровня, что позволяет исследовать распределение электрического потенциала на разных масштабных уровнях. 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. Ручное сканирование выполнено по восьми дорожкам для СС_1 и по пяти дорожкам для СС_2 преобразователем из стали X18Н10Т [7]. Для сварного соединения СС_2 для одной из измерительных дорожек был дополнительно использован преобразователь, изготовленный из золота. Время начала измерений и время конца измерений для каждого СС, вдоль каждой дорожки, приводится в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Время начала и конца измерений для каждой из восьми измерительных дорожек сварного соединения СС_1 [Start and end times of measurements for each of the eight measuring tracks of the welded joint СС_1]

Номер дорожки	Время измерений, с
1	1830-1934
2	2000-2566
3	2620-3220
4	3300-3900
5	3950-4660
6	4800-5400
7	5500-6110
8	6150-6755

Таблица 2 – Время начала и конца измерений для каждой из пяти измерительных дорожек сварного соединения СС_2 [Start and end times of measurements for each of the five measuring tracks of the welded joint СС_2]

Номер дорожки	Время измерений, с
1	650-1190
2	1270-1710
3	1800-2242
4	2300-2742
5	2820-3264
6	3430-3872

Пункт 6 в таблице 2 – преобразователь из золота (измерения выполнены по гребню валика усиления СС_2).

Температура воздуха в МЗ-1 соответствовала 11-12°C.

Профилометрия поверхности

Распределение волнистости и шероховатости на рабочей поверхности образца определяли с помощью универсального цифрового измерителя шероховатости поверхности фирмы *VOGEL*. Среднеарифметическое отклонение профиля поверхности R_a измеряли в 15 случайно выбранных точках на базе 0,25 мм (ГОСТ 2789-73) для СС_1, и в 9 выбранных точках для сварного соединения СС_2. Результаты измерения шероховатости приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Шероховатость СС_1, мкм [Roughness СС_1, μm]

1	1,42
2	2,17
3	0,91
4	2,09
5	0,47
6	0,55
7	0,69
8	0,18
9	0,15
10	0,13
11	0,18
12	0,20
13	0,21
14	0,17
15	0,24

Таблица 4 – Шероховатость СС_2, мкм [Roughness СС_2, μm]

1	2,31
2	0,08
3	0,45
4	0,11
5	0,15
6	0,22
7	0,12
8	0,10
9	0,13

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварное соединение СС_1

Распределение структурных неоднородностей (или микроскопических объемов напряженно-деформированного состояния) в объеме сварного соединения СС_1 показаны на рисунках 3-8 на различных уровнях фиксации SLS , формула (1):

$$SLS = |I_g|\Delta\varphi|, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – амплитуда измеренного сигнала.

Число уровней фиксации зависит от чувствительности измерительного прибора. Если за низший (минимальный) уровень фиксации взять значение «1,000», а за верхний (максимальный) уровень – «7,000», то получится порядка 6-ти тысяч различных значений SLS . На практике используется только несколько уровней фиксации, обычно в пределах десяти.

С увеличением значения уровня фиксации на потенциограммах проявляются неоднородности, расположенные на разной глубине залегания.

Рефлекс – изображение структурной неоднородности на потенциограмме. По форме рефлекса можно судить о распределении напряжений или деформаций вокруг неоднородности, которые окрашиваются в различные цвета или тона. Каждому цвету или тону соответствуют различные значения нормального контактного напряжения, действующего на площадке контакта преобразователя и объекта контроля.

На рисунке 2 приведены примеры некоторых рефлексов, относящихся к различным условиям испытаний и различным структурным неоднородностям. Наличие указанных структурных неоднородностей в приведенных объектах контроля подтверждены и зафиксированы методами УЗК, радиографии, нейтронографии и корреляции изображений. Ранее нами были установлены некоторые закономерности, касающиеся формы и распределения рефлексов на потенциограммах.

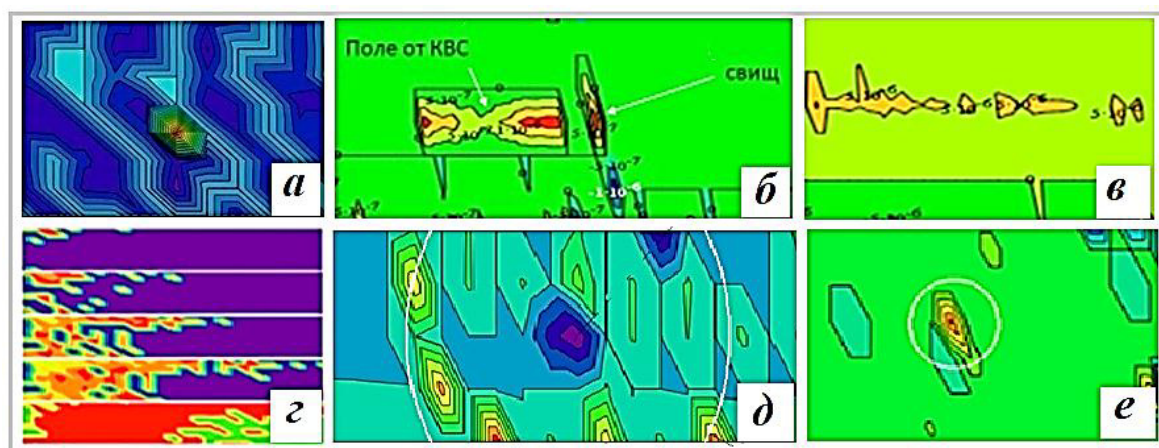


Рисунок 2 – Примеры рефлексов, относящихся к различным структурным неоднородностям в образцах из стали и в сварных соединениях стальных пластин: *a* – рефлекс области формирования зародыша микроскопической трещины при растяжении стали ЭИ 847 ($SLS= 4,699$); *b* – поле упругих напряжений вокруг вольфрамового осколка и рядом расположенный с ним свищ в сварном соединении ($SLS= 5,699$); *c* – непровар корня в сварном соединении двух стальных пластин ($SLS= 4,301$); *d* – процесс образования мартенсита при растяжении стали 12X18H10T ($SLS\sim 5$), показанный на пяти отдельных потенциограммах; *e* – небольшой кусок молибдена (в центре рисунка), помещенный на дно конической воронки в стальном бруске и заваренный там. Видны также рефлексы от линии основания конуса ($SLS= 2,155$); *e* – молибденовый цилиндр, помещенный по посадке с зазором в отверстие стальной пластины и заваренный там ($SLS= 5,238$) [Examples of reflections related to various structural inhomogeneities in steel specimens and in welded joints of steel plates: *a* – reflex of the area of formation of a microscopic crack nucleus during tension of EI 847 steel ($SLS = 4.699$); *b* – the field of elastic stresses around the tungsten fragment and a hole located next to it in the welded joint ($SLS = 5.699$); *c* – lack of root penetration in the welded joint of two steel plates ($SLS = 4.301$); *d* – the process of formation of martensite during tension of steel 12X18H10T ($SLS \sim 5$), shown in five separate potentiograms; *e* – a small piece of molybdenum (in the center of the figure), placed at the bottom of a conical funnel in a steel bar and welded there. Reflexes from the line of the base of the cone are also visible ($SLS = 2.155$); *e* – a molybdenum cylinder placed along a gap fit into a hole in a steel plate and welded there ($SLS = 5.238$)]

Классификация рефлексов по форме

Открытые и замкнутые фигуры, ограниченные тонкими линиями – обозначают области объемных структурных неоднородностей, имеющих вид фигур правильной или неправильной формы. Замкнутые фигуры, как правило, ограничены изопотенциальными линиями.

Концентрические шестиугольные рефлексы – микро-области, с поперечными размерами порядка 1 мм или менее, характеризующие наличие внутренних остаточных напряжений в объекте контроля. Наблюдаются на одном, либо нескольких следующих друг за другом уровнях фиксации.

Концентрические фигуры неправильной формы – наблюдаются на одном или следующих друг за другом уровнях фиксации, характеризуют образованные в объеме образца одиночные или групповые области структурных неоднородностей, излучающие волны упругих напряжений определенной амплитуды и длины волны.

Полосовая структура – обычно наблюдается при растяжении или сжатии металла. Видимый на потенциограмме наклон цветовой полосы относительно горизонтальной или вертикальной оси характеризует соотношение между величинами нормальных и касательных напряжений.

Ячеистая структура – ограниченные области, находящиеся в объеме образца, рефлексы от которых, по форме напоминают соты.

Нами установлен интервал значений уровней фиксации для выявления упругой, микропластической и пластической деформации в металлах, соответствующий $SLS=2,523-3,523$. Значения уровня фиксации, на котором были зафиксированы зародыши микроскопических трещин в сталях, лежат в интервале $SLS=4-5$ [8-10]. При работе в зонах и на участках контроля, где вероятно образование микроскопических трещин особое внимание следует обращать на рефлексы, соответствующие уровню фиксации $SLS=4,854$.

Для каждого уровня фиксации на представленных рисунках показаны три потенциограммы, соответствующие трем отдельным участкам СС (для дуги трубопровода длиной, примерно равной $2\pi/3$): 0-200; 200-400 и 400-600 отсчетов. Анализ результатов начинается с прохождения всех уровней фиксации: от самого низкого значения $SLS=1$ и до наиболее высокого значения $SLS=6$ с выбранным шагом фиксации, что позволяет определить наличие структурных неоднородностей и их объемное распределение. По результатам выполненного анализа выносятся оценка качества сварного соединения, а также соответствие состояния металла установленным требованиям и нормам.

На рисунке 3 показано распределение структурных неоднородностей по длине сварного соединения, которое приблизительно можно считать равномерным. В соответствии с приведенной классификацией, на потенциограммах присутствуют концентрические рефлексы правильной шестиугольной формы, а также концентрические рефлексы неправильной формы.

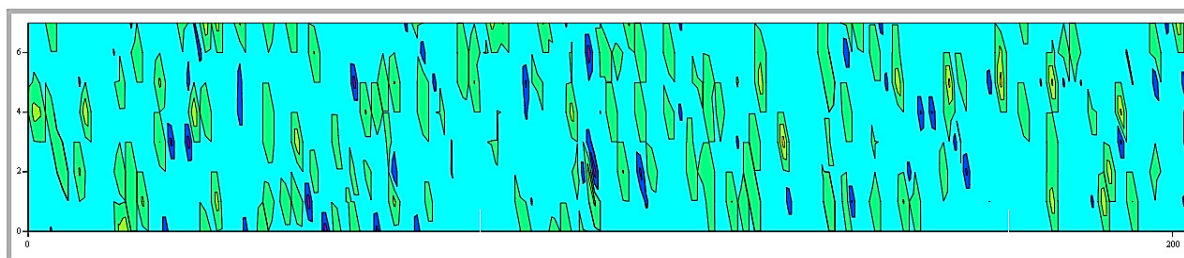
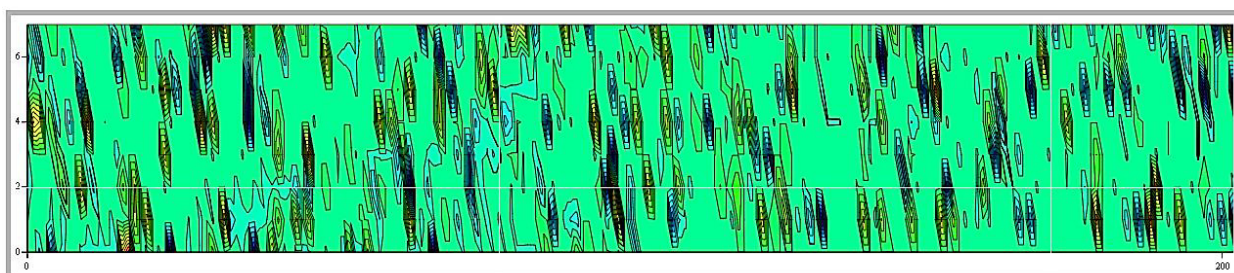


Рисунок 3 – Фрагмент потенциограммы для СС_1, $SLS=1$. Координатная ось x – число отсчетов; ось y – номера измерительных дорожек [Fragment of the potentiogram for СС_1, $SLS = 1$. The x -axis is the number of samples; y -axis – numbers of measuring tracks]

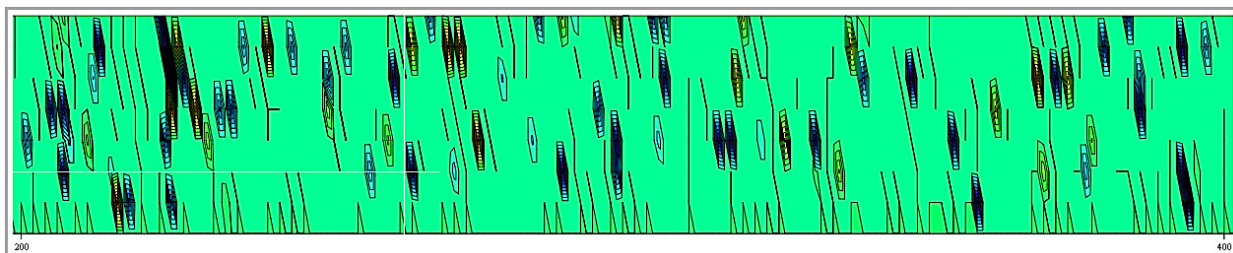
С увеличением уровня фиксации происходит разделение (и перераспределение) неоднородностей по условным горизонтальным направлениям, параллельным продольной оси СС. В частности, по оси y можно увидеть формирование нескольких таких направлений. Рефлексы, появляющиеся на уровне $SLS=2$ соответствуют высоким значениям разности контактных потенциалов. На рисунке 5 в увеличенном масштабе для $SLS=2$ (максимальное число отсчетов равно 50-ти) можно увидеть рефлексы (шестиугольные фигуры) с высоким градиентом разности электрического потенциала. Такой рефлекс свидетельствует о наличии локального объема с относительно высокими внутренними напряжениями.

На рисунке 4 б (для $SLS=3$) на потенциограммах присутствует большое количество тонких прямых и ломаных линий в поперечном направлении, относительно продольной оси шва, которые формируют фигуры неправильной формы. С увеличением уровня фиксации (до $SLS=4$) происходит «раскрытие» или «уширение» тонких линий, которые принимают вид отдельных пятен и полос (рис. 4 в и б а). Вследствие большого количества таких пятен в горизонтальном направлении происходит их объединение и слияние в широкую полосовую структуру.

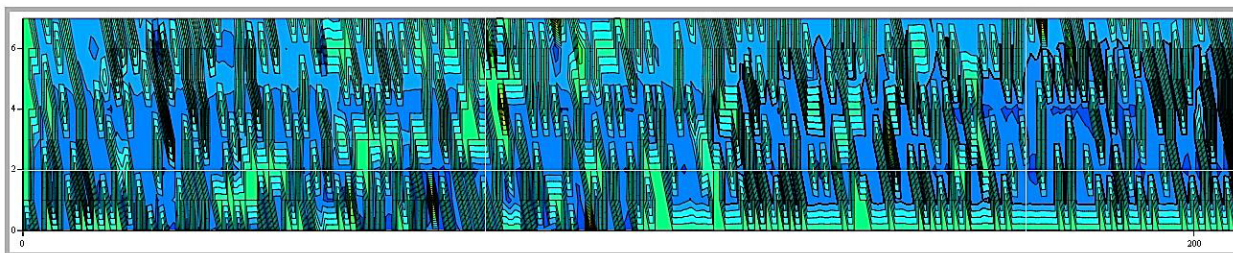
Таким образом, постепенно начинает формироваться наиболее протяженный рефлекс структурной неоднородности сварного соединения, который проходит вдоль его оси, по середине потенциограммы, от начала и до ее конца. Формируются и другие рефлексы, соответствующие другим неоднородностям. Эти неоднородности излучают упругие волны в относительно узком диапазоне амплитуд, поскольку уже на следующем уровне фиксации, при $SLS=5$ и $SLS=6$, на потенциограммах присутствуют только отдельные, одиночные неоднородности (рис. 4 з и 4 д).



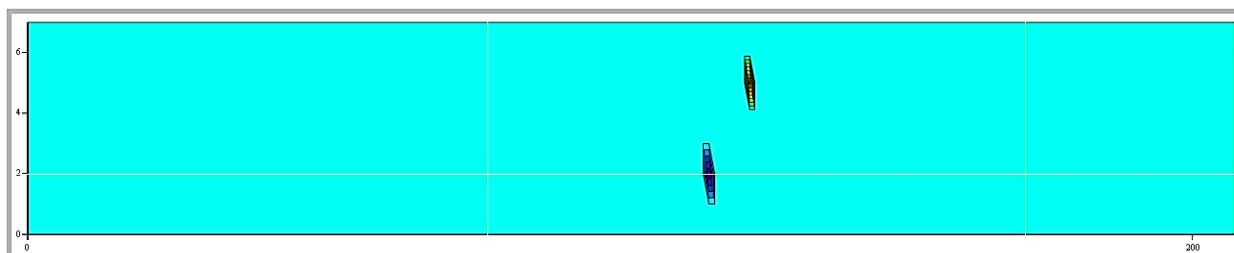
а)



б)

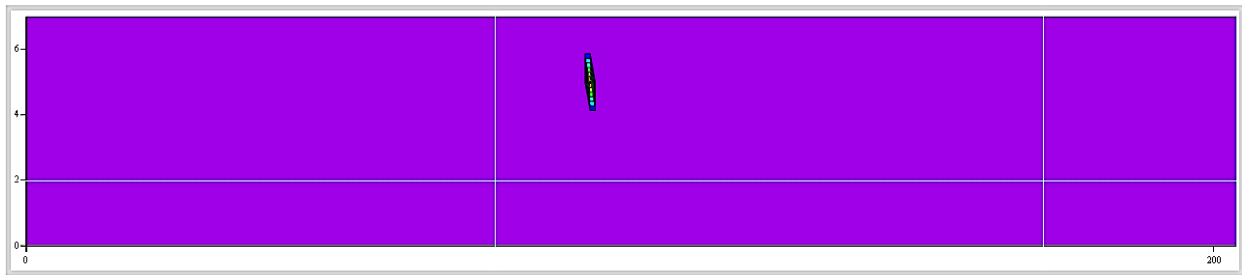


в)



г)

Рисунок 4 – Фрагменты потенциограмм для CC_1: а) $SLS=2$; б) $SLS=3$; в) $SLS=4$; г) $SLS=5$
 [Fragments of potentiograms for CC_1: a) $SLS = 2$; b) $SLS = 3$; c) $SLS = 4$; d) $SLS = 5$]



д)

Рисунок 4 (продолжение) – Фрагменты потенциограмм для CC_1: д) $SLS=6$
[Fragments of potentiograms for CC_1: e) $SLS = 6$]

На рисунке 5 показана трансформация рефлексов прямолинейных и ломаных линий при переходе с одного уровня SLS на другой.

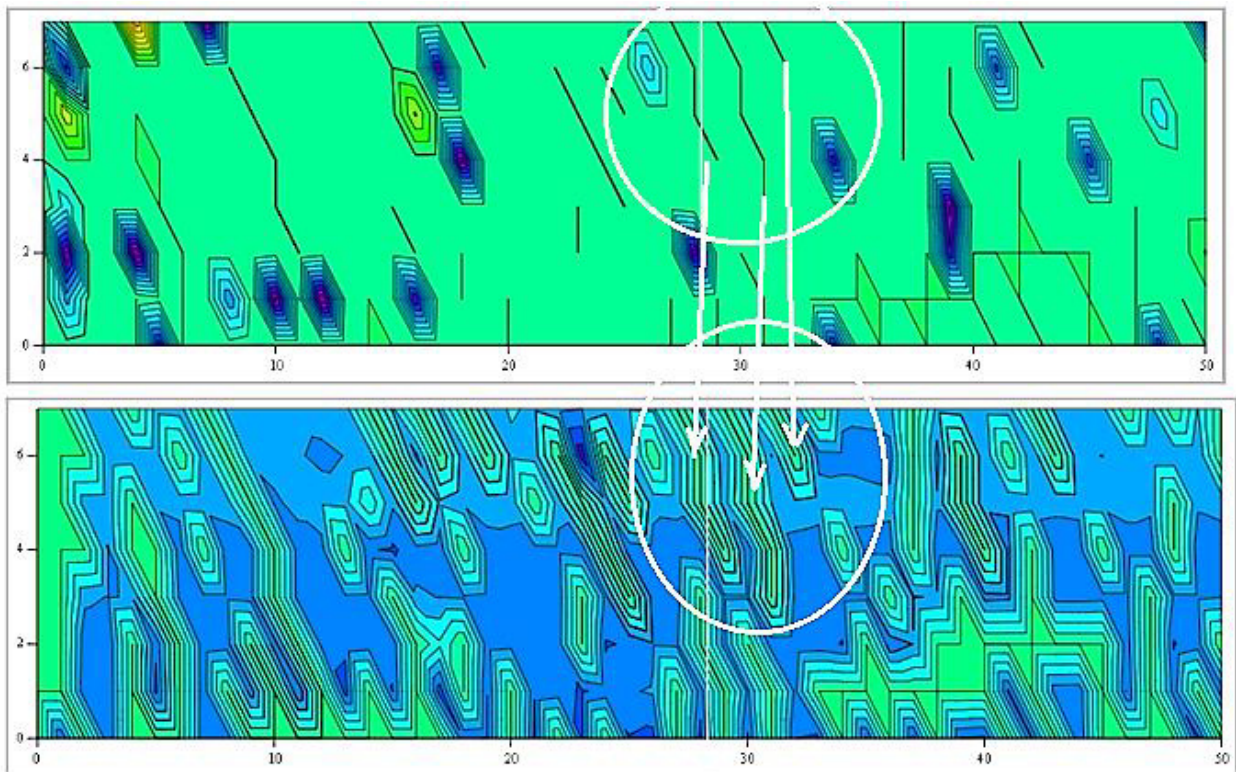
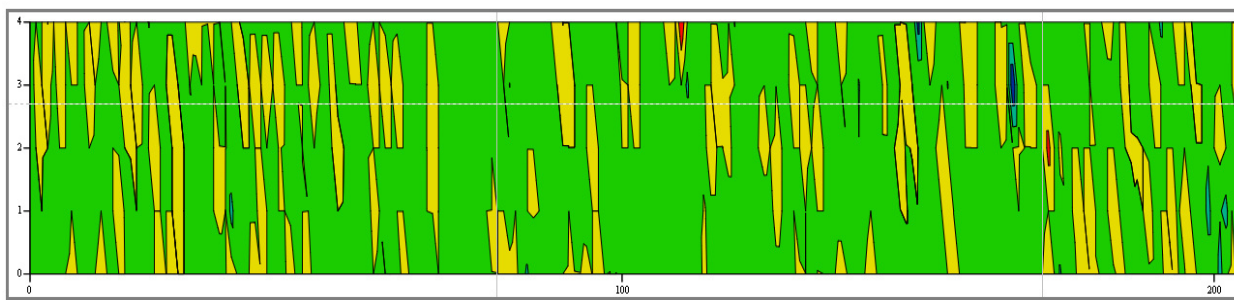


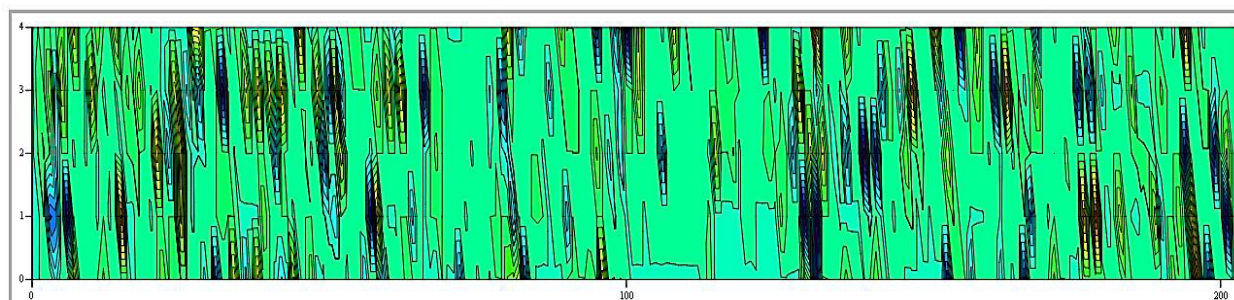
Рисунок 5 – Трансформация линейного рефлекса при увеличении чувствительности с уровня $SLS=3$ (верхний) до уровня $SLS=4$ (нижний) [Transformation of the linear reflex with increasing sensitivity from the level $SLS = 3$ (upper) to the level $SLS = 4$ (lower)]

Сварное соединение CC_2

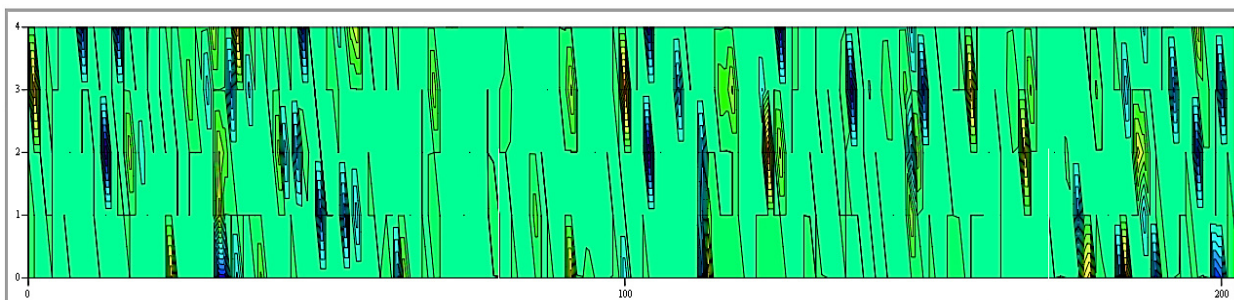
На рисунке 6 показано распределение структурных неоднородностей по длине сварного соединения CC_2. Сравнивая потенциограммы CC_1 и CC_2 для $SLS=2$ в одном масштабе, можно увидеть различия, обусловленные разными материалами сварных соединений. Например, концентрические шестиугольные рефлексы для CC_2 в поперечном направлении более вытянуты, что свидетельствует о больших действующих касательных напряжениях (см. рис. 4 а и б б) Аналогичный вывод можно сделать из сравнения потенциограмм на уровне $SLS=3$ (см. рис. 4 б и в).



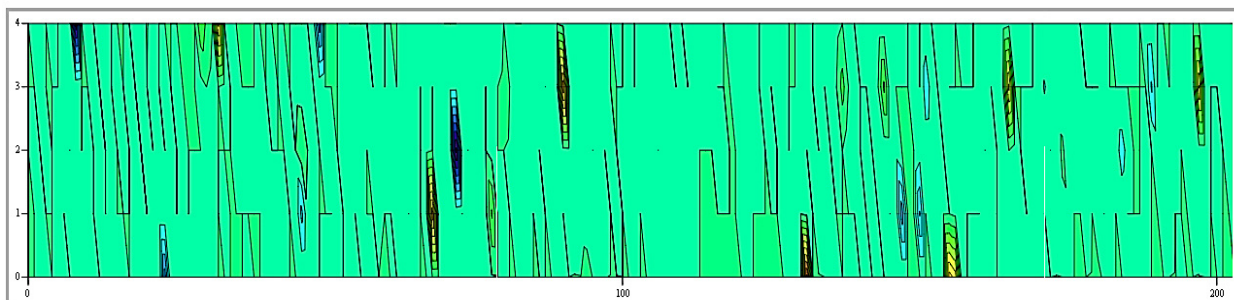
а)



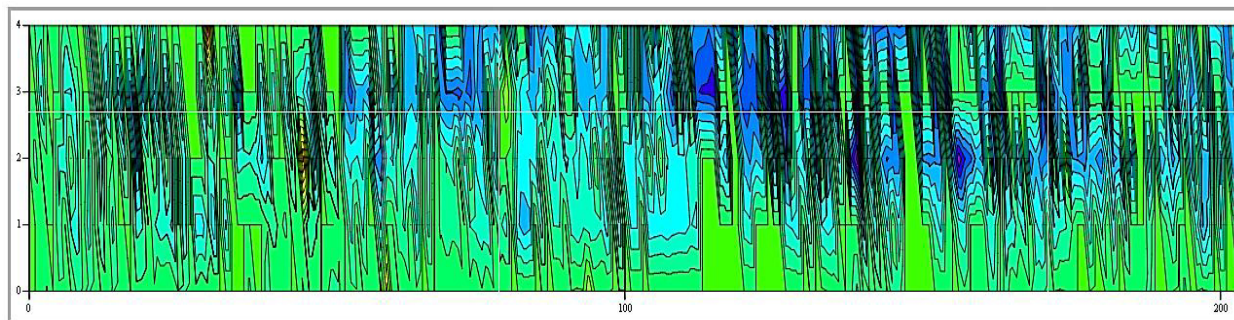
б)



в)



г)



д)

Рисунок 6 – Фрагменты потенциограмм для CC_2: а) SLS=1; б) SLS=2; в) SLS=3; г) SLS=4; д) SLS=5
[Fragments potentiograms for CC_2: a) SLS = 1; b) SLS = 2; c) SLS = 3; d) SLS = 4; e) SLS = 5]

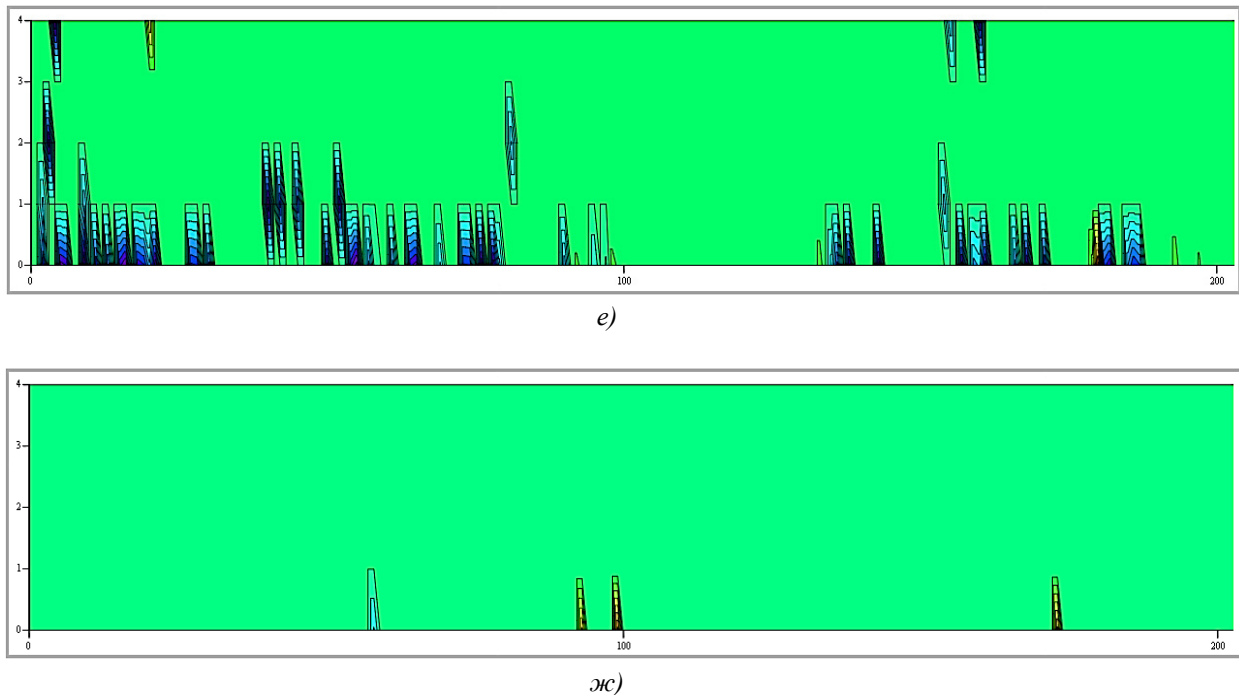


Рисунок 6 (продолжение) – Фрагменты потенциограмм для СС_2: *е)* $SLS=6$; *ж)* $SLS=7$
 [Fragments potentiograms for СС_2: *ф)* $SLS = 6$; *г)* $SLS = 7$]

Особенно заметны различия при сравнении материалов сварных соединений, представленные на рисунках 4 *з* и 6 *д* для уровня $SLS=5$. Если на потенциограммах для СС_1 на данном уровне фиксации видны лишь отдельные одиночные концентрические шестиугольные рефлекссы, то в другом случае, для СС_2, мы видим подробную картину структурных неоднородностей на глубине залегания, примерно соответствующей внутренней поверхности сварного соединения, и, вероятно, связанную с протекающим процессом коррозии металла или дефектом, образованном при сварке. Информацию о подобных структурных повреждениях СС_1 можно также получить из рисунка 4 *в* на $SLS=4$ или других более высоких уровнях фиксации.

Результатами проведенного исследования подтверждается, что основной металл обоих сварных соединений находится в пластически деформированном состоянии. Данное состояние возникает при сварке в результате интенсивного местного разогрева сварного соединения. В этом случае возможность свободного удлинения его исключается из-за жесткого закрепления свариваемых труб с противоположных концов. Поэтому в сварном соединении возникают сжимающие внутренние напряжения, по величине равные или превышающие предел текучести. В результате чего в нагретой зоне происходит пластическая деформация металла.

Данный известный факт подтверждается нашими результатами, которые показаны на рисунке 7. На нем представлены потенциограммы для двух сварных соединений СС_1 и СС_2, а также потенциограмма для образца из стали ЭИ-847, находящегося в условиях растяжения на разрывной машине. Все результаты приведены для выбранного значения уровня фиксации $SLS=3,523$. Потенциограмма для образца из стали ЭИ-847 была построена в процессе пластического течения материала, когда необратимая деформация образца составляла 5 %.

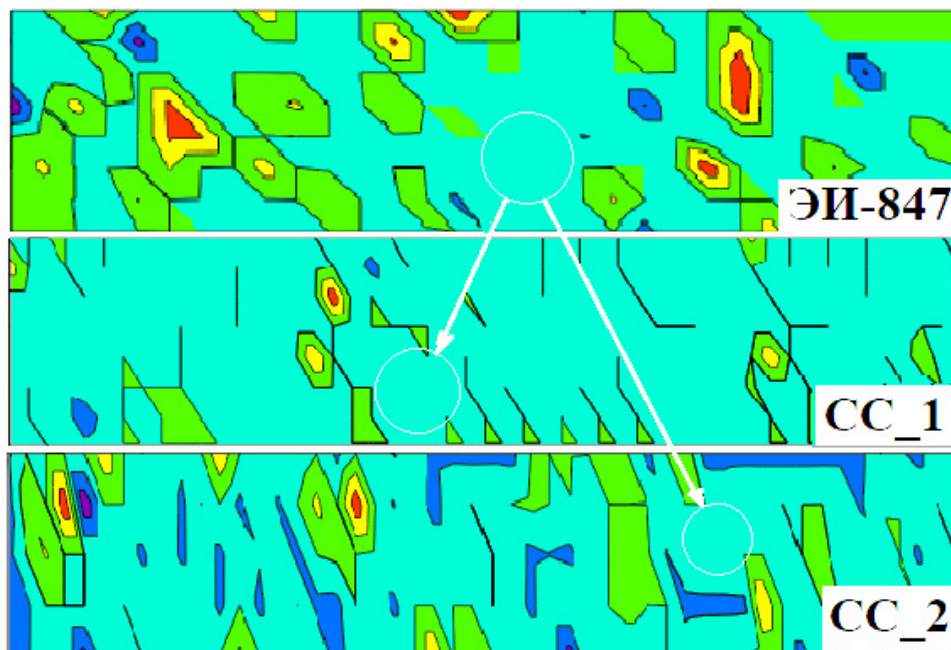


Рисунок 7 – Сравнение потенциграмм, построенных для СС_1 и СС_2, а также для образца из стали ЭИ-847, деформированного при растяжении (результаты приведены для значения уровня фиксации $SLS=3,523$) [Comparison of potentiograms constructed for СС_1 and СС_2 as well as for a specimen made of steel EI-847, deformed under tension (the results are given for the value of the fixation level $SLS = 3.523$)]

Кругами выделены произвольно выбранные области пластически деформированного металла. На этом фоне рефлексии другого цвета представляют собой локальные участки упруго деформированного состояния (синего цвета), отдельные включения, а также зоны с более высокой, чем в выделенной области, степенью деформации (желтого и красного цвета).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ СКП И МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

После проведенного исследования сварные соединения технологического трубопровода были проконтролированы методом магнитной анизотропии (ММА) с помощью прибора *Stressvision Expert* [11, 12].

На рисунке 8 представлены результаты контроля ММА, а на рисунке 9 – результаты СКП, которые на следующих рисунках качественно сравниваются между собой по совпадению изображений структурных нарушений и по объему полученной информации.

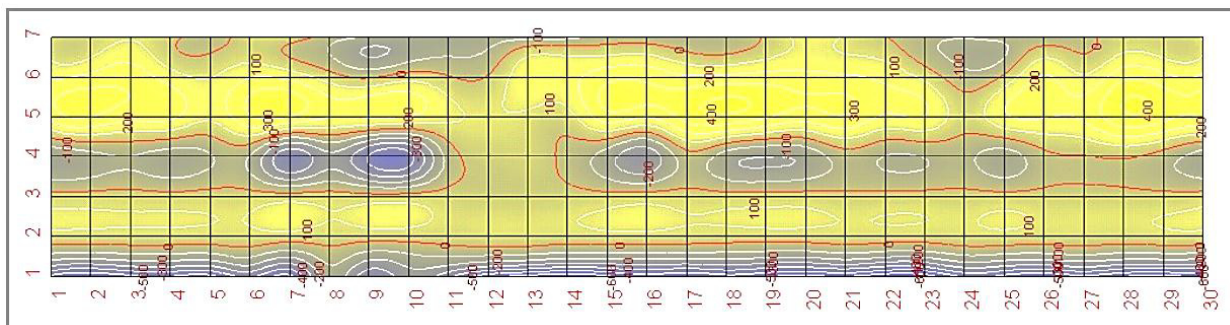


Рисунок 8 – Карта РГМН (разницы главных механических напряжений) сварного соединения СС_1 [Map of differences in main mechanical stresses of the welded joint SS_1]

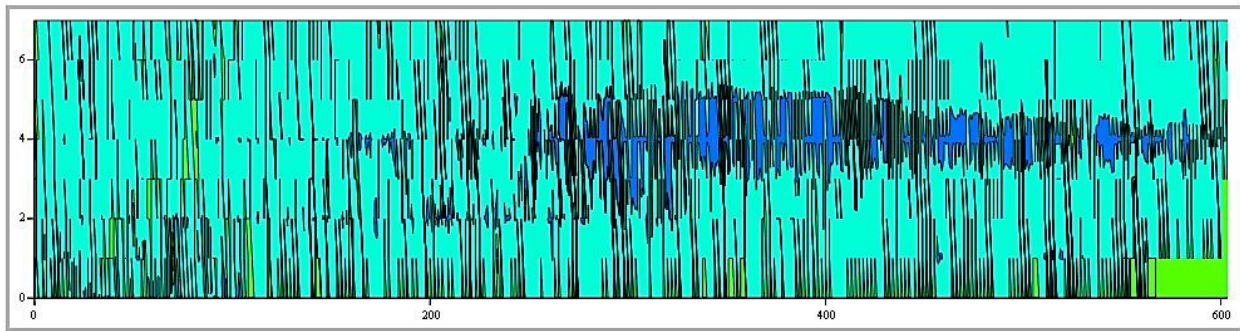


Рисунок 9 – Потенциграмма того же сварного соединения на уровне фиксации $SLS=3,959$ [Potentiogram of the same welded joint at the clamping level $SLS = 3.959$]

На рисунке 10 показаны результаты, полученные методами магнитной анизотропии МА (верхний рисунок) и методом СКП (нижний рисунок).

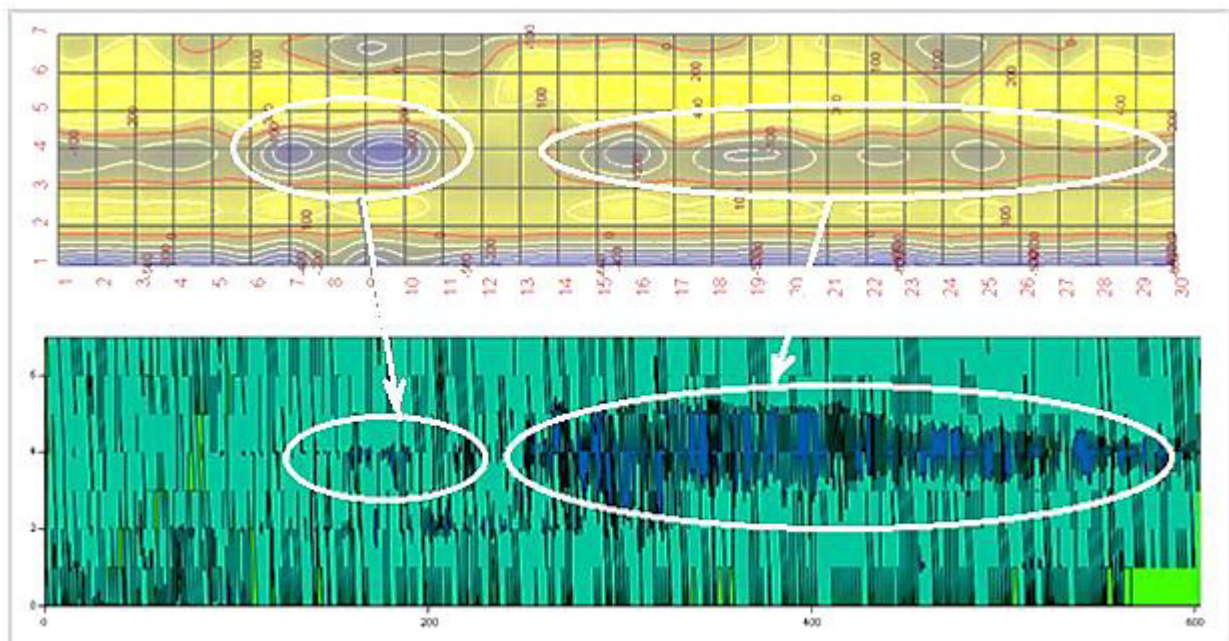


Рисунок 10 – Сравнение результатов, полученных методами МА (прибор Stressvision, верхний рисунок) и методом СКП (нижний рисунок), выделены структурные нарушения в области корня сварного соединения [Comparison of the results obtained by the methods of magnetic anisotropy (Stressvision device, upper figure) and the method of scanning contact potentiometry (lower figure), structural defects in the region of the root of the welded joint are highlighted]

На представленных рисунках видно заметное сходство локализации неоднородностей. Данные МА, позволили определить тот амплитудный интервал сигналов для метода СКП и соответствующий уровень фиксации, на котором обнаружены структурные нарушения методом МА. Наблюдаемое соответствие позволяет установить важные корреляции, связанные с влиянием напряженно-деформированного состояния микрообъемов сварного соединения на его электрические и магнитные свойства.

И в том и другом случае видны структурные неоднородности в области корня сварного соединения, выделенные на рисунке 20 в белые овалы. Обращает внимание более интенсивный вид неоднородностей с правой стороны рисунка для СКП (правый овал) и менее интенсивный вид неоднородностей с левой стороны рисунка, по сравнению с результатами МА.

Рефлексы структурных неоднородностей на потенциграмме имеют максимальную протяженность 5-6 мм, минимальную – менее 1 мм. Сравнение

выявленных обоими методами неоднородностей в области разделки корня представлены на рисунке 11.

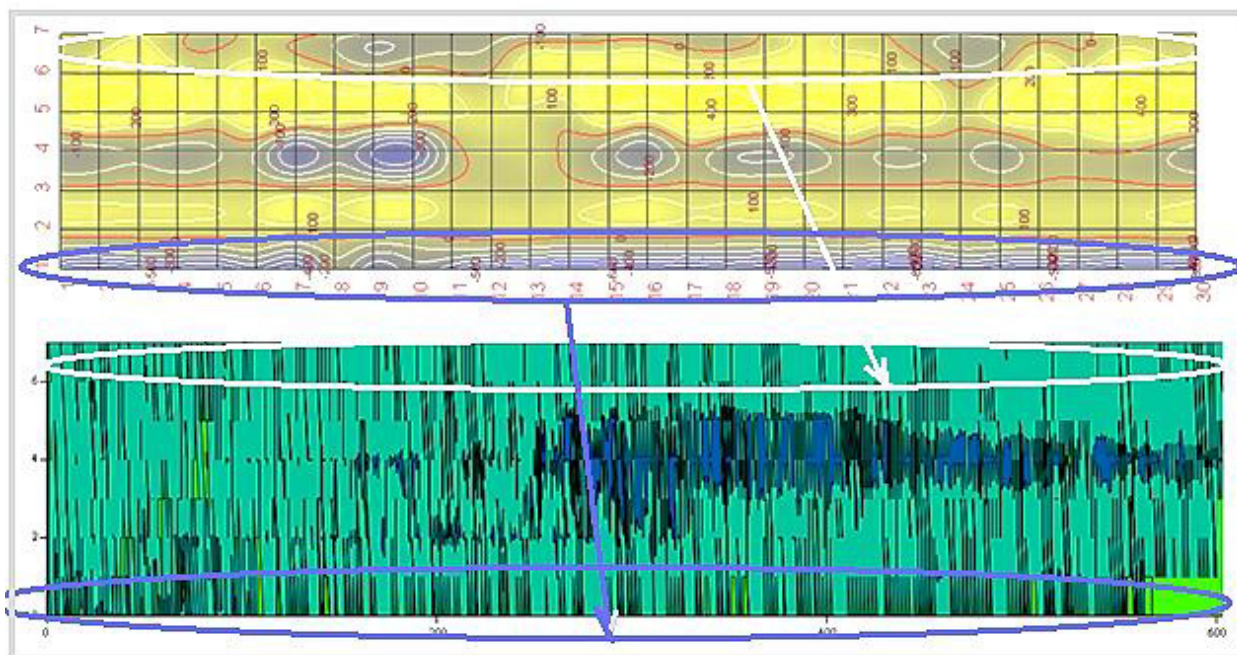


Рисунок 11 – Сравнение результатов, полученных методами МА (верхний рисунок) и методом СКП (нижний рисунок) для СС_1, выделены структурные нарушения в области разделки корня [Comparison of the results obtained by the methods of magnetic anisotropy (upper figure) and the method of scanning contact potentiometry (lower figure) for CC_1, structural defects in the root preparation area are highlighted]

Здесь также как и в предыдущем случае видны заметные сходства. Так для обоих методов, в верхней части рисунков, выделенных белыми овалами, неоднородностей значительно меньше, чем в нижней части рисунка, выделенных голубыми овалами. Для ММА этот вывод следует из цвета верхней кромки рисунка, окрашенной в бледно-серые тона, и цвета нижней кромки, окрашенной в светло-голубой тон. Для метода СКП этот вывод также очевиден, поскольку в верхней части потенциограммы число рефлексов заметно меньше, чем в нижней части рисунка. Помимо этого, рефлексy еще и различаются по своей форме. На уровне фиксации $SLS=3,959$ рефлексy имеют вид, представленный на рисунке 12 в увеличенном масштабе.

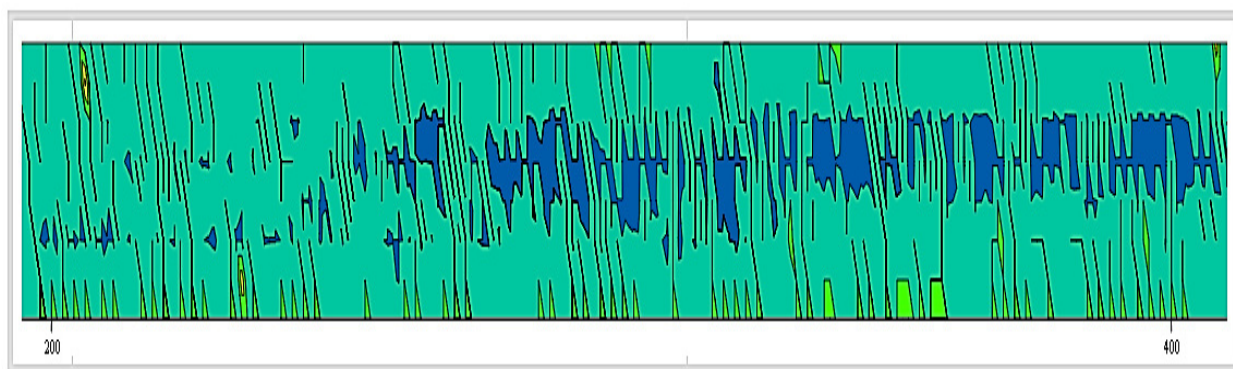


Рисунок 12 – Увеличенное изображение структурных неоднородностей на потенциограмме в области корня и в области разделки корня. Показан фрагмент потенциограммы в интервале отсчетов 200...400 [Enlarged image of structural irregularities in the potentiogram in the root area and in the root preparation area. A fragment of a potentiogram in the sampling interval 200 ... 400 is shown]

Хорошо видны микроскопические области напряженно-деформированного состояния в области корня сварного соединения. Причем, как следует из рисунков 10-12, указанные нарушения занимают правую часть потенциограммы, соответствующую нижней и левой части корня сварного соединения, как показано в сечении трубы на рисунке 13.



Рисунок 13 – Распределение неоднородностей в корне СС по результатам обоих методов НК в сечении перпендикулярном оси трубопровода [Distribution of inhomogeneities in the CC root according to the results of both methods in a section perpendicular to the pipeline axis]

С помощью метода двойной амплитудной дискриминации сигналов контроля выделено ядро протяженной структурной неоднородности в области корня сварного соединения (рис. 14).

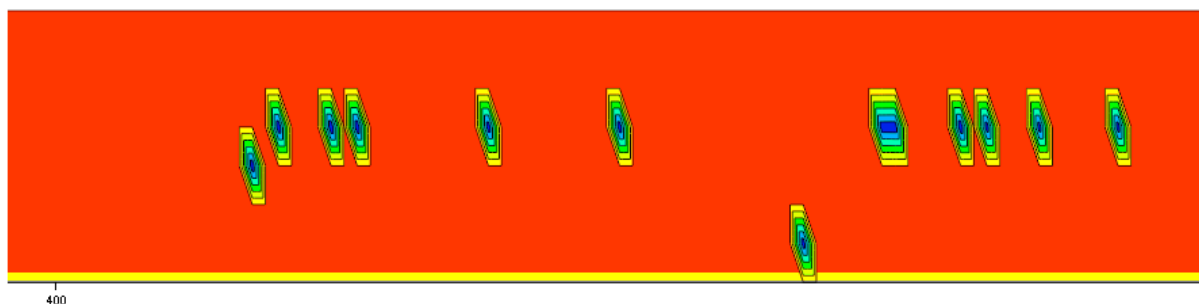


Рисунок 14 – Выделение локальных областей напряженно-деформированного состояния в области корня сварного соединения [Identification of local areas of the stress-strain state in the region of the root of the welded joint]

Видны отдельные локальные микро-области напряженно-деформированного состояния с четко выраженными внутренними напряжениями, направленными перпендикулярно оси сварного соединения.

Сравнение локализованных неоднородностей для второго сварного соединения СС_2 представлены на рисунке 15.

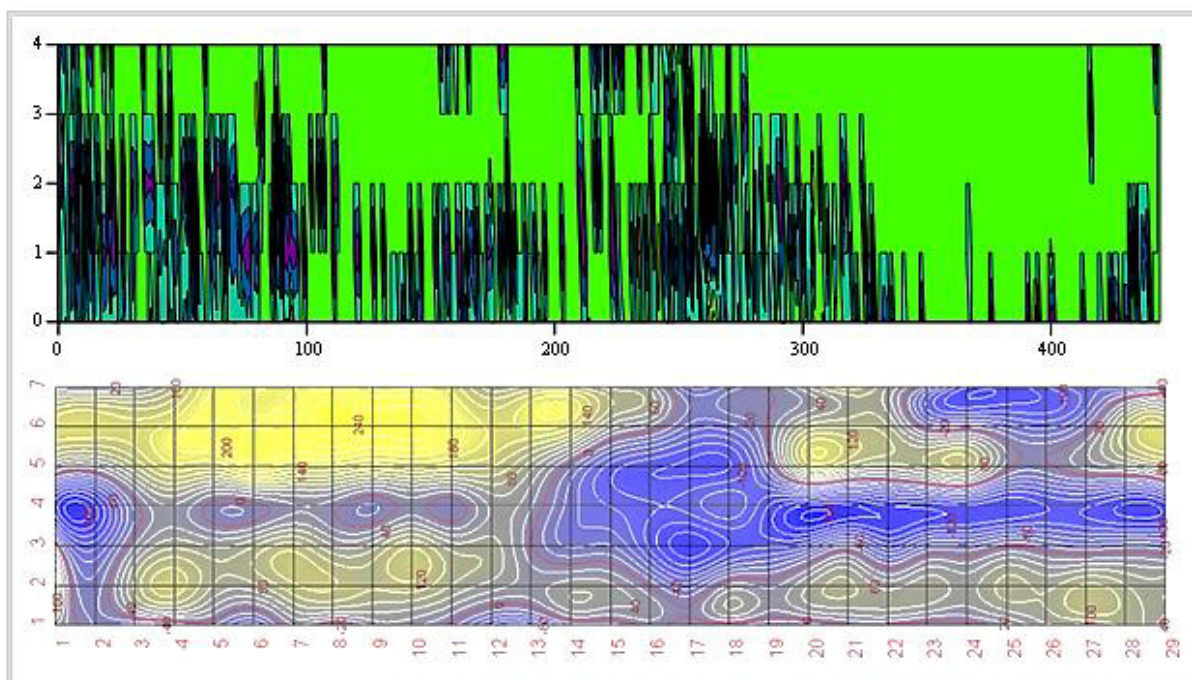


Рисунок 15 – Сравнение результатов, полученных методами магнитной анизотропии (нижний рисунок) и методом сканирующей контактной потенциометрии (верхний рисунок, SLS= 5,523) для CC_2
 [Comparison of the results obtained by the methods of magnetic anisotropy (lower figure) and the method of scanning contact potentiometry (upper figure, SLS = 5.523) for CC_2]

В таблице 5 приводятся сравнительные характеристики прибора *Stressvision Expert*, взятые с официального сайта разработчика, и прибора *Spectroelph*, изготовленного в лаборатории *ElphysLAB* НИЯУ МИФИ.

Таблица 5 – Технические характеристики магнитоанізотропного сканера-дефектоскопа *Stressvision Expert V.2.013* и электрофизического сканера поверхности *Spectroelph-2M* [Technical characteristics of the *Stressvision Expert V.2.013* magnetoanisotropic flaw detector and *Spectroelph-2M* electrophysical surface scanner]

Характеристики	Значения	
	<i>Stressvision Expert</i>	<i>Spectroelph-2M</i>
Минимальная площадь сканирования, мм	30x30	5x5
Число узлов сканирования, мин.-макс., шт	25-93278	не ограничено
Максимальное число зон сканирования, шт	3700	не ограничено
Рабочий температурный диапазон, °С	от -10 до +55	от -10 до +55
Извлечение информации производится послойно ниже уровня наклепа с глубин, мм	1-20	1-70
Зачистка поверхности объекта контроля	не требуется	требуется
Время измерений в одной точке, сек	1	1
Позиционирование датчика	плоские и криволинейные поверхности	плоские и криволинейные поверхности
Качественная оценка результатов измерений, мин	до 3	до 5
Опасное излучение	отсутствует	отсутствует
Контроль в АЗ	не возможен	возможен
Контролируемые материалы	магнитные металлы и сплавы	любые металлы, сплавы, фазы внедрения и т.п.

Заключение

1. Впервые сотрудниками НИЯУ МИФИ, ВИТИ НИЯУ МИФИ и сотрудниками отдела технической диагностики Ростовской атомной станции организованы, подготовлены и проведены испытания нового метода неразрушающего контроля – метода сканирующей контактной потенциометрии на действующем технологическом оборудовании АЭС.

2. Объектом исследования являлись сварные соединения технологического трубопровода, находящиеся в машинном зале (МЗ-1) ТО-1.

3. Результаты проведенного исследования показали высокую эффективность метода СКП как инструмента дополнительного контроля оборудования АЭС и необходимость дальнейших разработок и внедрения соответствующих измерительных методик, аппаратуры в целях их широкого практического применения.

4. Полученными данными подтверждается, что основной металл исследованных сварных соединений находится в пластически деформированном состоянии. По оси сварного соединения СС_1 на внутренней поверхности, на дуге длиной примерно в π -радиан, обнаружены протяженные структурные неоднородности.

5. Наблюдаемые соответствия результатов метода сканирующей контактной потенциометрии и магнитной анизотропии позволяют установить важные физические корреляции, связанные с влиянием напряженно-деформированного состояния микрообъемов сварного соединения на его электрические и магнитные свойства.

Благодарность

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и выделенным грантом по договору №19-08-00266/20 от 10.01.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грешников, В.А.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В.А. Грешников, Ю.В. Дробот. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 272 с.
2. *Сурин, В.И.* Электрофизические методы неразрушающего контроля и исследования реакторных материалов / В.И. Сурин, Н.А. Евстохин. – Москва : МИФИ, 2008. – 166 с.
3. Об использовании метода электросопротивления и термо-эдс в реакторных условиях / В.И. Сурин [и др.] // Техника реакторного эксперимента : сборник научных трудов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 119 с.
4. *Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I.* Conductivity of fission-damaged uranium nitride // J.Nucl. Mater., 1995. Vol. 218. P. 268-272.
5. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования / В. И. Сурин [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4(21). – С. 51-62.
6. *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.
7. *Абу Газал, А.А.* Экспериментальное исследование процесса разрушения стали ЭИ847 методами структурного анализа / А.А. Абу Газал [и др.] // Письма о материалах. – 2019. – Вып. 1, № 9. – С. 33-38.
8. *Абу Газал, А.А.* Расчетно-экспериментальный метод моделирования остаточных напряжений в сварных соединениях / А.А. Абу Газал [и др.] // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 2. – С. 48-55.
9. *Сурин, В.И.* Спектральный анализ диагностических сигналов на основе интегральных преобразований // Информационные технологии в проектировании и производстве / В.И. Сурин, Т.В. Губина, А.А. Абу Газал, А.Е. Вебер. – 2016. – № 2. – С. 37-44.
10. *Arefinkina, S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I.* Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials // Modern problems of theory machines / SEC «MS». – North Charleston, USA, 2016. №4. P. 177-183.
11. *Адаменков, А.К.* Обеспечение контроля термомеханической нагруженности узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000 / А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, И.В. Малахов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4(17). – С. 84-89.

12. Адаменков, А.К. Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии // А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, В. Я. Шпицер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 113-119.

REFERENCES

- [1] Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. Akusticheskaya emissiya. Primeneniye dlya ispytaniy materialov i izdeliy [Acoustic Emissions. Application for Testing Materials and Products]. Moskva: Izdatel'stvo standartov [Moscow: Standards Publishing House]. 1976. 272 p. (in Russian).
- [2] Surin V.I., Yevstyukhin N.A. Elektrofizicheskiye metody nerazrushayushchego kontrolya i issledovaniya reaktornykh materialov [Electrophysical Methods of Non-Destructive Testing and Research of Reactor Materials]. Moskva: MIFI [Moscow: MEPHI]. 2008. 166 p. (in Russian).
- [3] Surin V.I., Yevstyukhin N.A., Knyazev V.I., Tarasov S.N., Pisarenko K.L. Ob ispol'zovanii metoda elektrosoprotivleniya i termo-eds v reaktornykh usloviyakh [The Use of the Method of Electrical Resistance and Thermo-Emf in Reactor Conditions]. Tekhnika reaktornogo eksperimenta [Reactor Experiment Technique]. Moscow [Moskva]: Energoatomizdat. 1987. 119 p. (in Russian).
- [4] Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I. Conductivity of Fission-Damaged Uranium Nitride// J.Nucl. Mater., 1995. Vol. 218. P. 268-272 (in English).
- [5] Surin V.I., Volkova Z.S., Denisov R.A., Motovilin V.D., Reyn N.V. Metody elektrofizicheskoy diagnostiki i kontrolya reaktornogo oborudovaniya [Methods of Electrophysical Diagnostics and Control of Reactor Equipment]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. Moskva: NIYAU MIFI [Moscow: NRNU]. 2016. №4(21). P. 51-62 (in Russian).
- [6] Surin V.I., Pol'skiy V.I., Osintsev A.V., Dzhumayev P.S. Primeneniye metoda skaniruyushchey kontaktnoy potentsiometrii dlya registratsii obrazovaniya zarodyshevoy treshchiny v stalyakh [Application of Scanning Contact Potentiometry Method to Register the Formation of an Embryonic Crack in Steels]. Defektoskopiya [Defectoscopy]. №1. 2019. P. 53-60 (in Russian).
- [7] Abu Gazal A.A., Dzhumayev P.S., Osintsev A.V., Pol'skiy V.I., Surin V.I. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa razrusheniya stali EI847 metodami strukturnogo analiza [Experimental Study of the Process of Destruction of Steel EI847 by Methods of Structural Analysis]. Pis'ma o materialakh [Letters on Materials] 2019. V.1. №9. P. 33-38 (in Russian).
- [8] Abu Gazal A.A., Surin V.I., Alvakheba A.I., Shef Ye.A., Bokuchava G.D., Papushkin I.V. Raschetno-eksperimental'nyy metod modelirovaniya ostatochnykh napryazheniy v svarnykh soyedineniyakh [Calculation-Experimental Method for Modeling Residual Stresses in Welded Joints]. Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve [Information Technologies in Design and Production]. Moskva: FGUP VIMI [Moscow: FGUP VIMI]. №2. 2018. P. 48-55 (in Russian).
- [9] Surin V.I., Gubina T.V., Abu Gazal A.A., Veber A.Ye. Spektral'nyy analiz diagnosticheskikh signalov na osnove integral'nykh preobrazovaniy [Spectral Analysis of Diagnostic Signals Based on Integral Transformations]. Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve [Information Technologies in Design and Production]. Moskva: FGUP VIMI [Moscow: FGUP VIMI]. 2016. №2. P. 37-44 (in Russian).
- [10] Arefinkina S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials // Modern Problems of Theory Machines / SEC «MS». North Charleston, USA, 2016. №4. P. 177-183 (in Russian).
- [11] Adamenkov, A.K., Veselova I.N., Malakhov I.V. Obespecheniye kontrolya termomekhanicheskoy nagruzhennosti uzla privarki kollektora teplonositelya k patrubku Du1200 parogeneratorov PGV-1000 [Ensuring Control of Thermomechanical Loading of the Unit for Welding the Coolant Collector to the DN1200 Branch Pipe of PGV-1000 Steam Generators]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2015. № 4(17). P. 84-89 (in Russian).
- [12] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpitser V.Ya. Otsenka razvitiya errozionno-korrozionnogo iznosa s pomoshch'yu metoda izmereniya magnitnoy anizotropii [Assessment of the Development of Erosion-Corrosion Wear Using the Method of Measuring Magnetic Anisotropy]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. № 1(30). P. 113-119 (in Russian).

Research of Secondary Circuit Welded Connections of the Engine Room by the Method of Scanning Contact Potentiometry

A.K. Adamenkov^{*1}, M.I. Malakhov^{*,**}, V.D. Ozhereliev^{*2}, V.I. Surin^{***3}

^{*}Rostov nuclear power plant, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

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

^{***}National Research Nuclear University NRNU «MEPhI», Kashirskoe shosse, 31, Moscow, Russia

¹ORCID iD: 0000-0001-7342-0231

WoS Researcher ID: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-8188-6696

e-mail: victorozhereliev@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0001-6153-0206

e-mail: VISurin@mephi.ru

Abstract – The electrophysical system of non-destructive testing is tested on the NPP operating process equipment. The welded joints of the process pipeline located in the turbine hall are selected as the object of control. The results of the study confirm that the base metal of the welded joints is in a plastically deformed state. A comparison of the results of testing welded joints by scanning contact potentiometry and magnetic anisotropy methods is presented.

Keywords: scanning contact potentiometry method, non-destructive testing of welded joints, magnetic anisotropy method.