

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 620.179.13: 621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-05
EDN TFDGAT

**Представление результатов электрического контроля методом
электрофизической хроматографии**

**В.И. Сурин¹  , А.С. Щербань² , А.А. Щербаков¹ , М.Б. Иваний¹ ,
М.Е. Жидков², С.А. Томилин³ , А.В. Козлов²**

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

² Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

³ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 VISurin@mephi.ru

Аннотация. Впервые для визуализации результатов электрического неразрушающего контроля предложен метод электрофизической хроматографии. Поверхностные потенциограммы, обычно применяемые для представления результатов сканирующей контактной потенциометрии, заменяются объемными изображениями структурных неоднородностей. Альтернатива имеет очевидные преимущества, поскольку полезная дополнительная информация способна кардинально изменить результаты контроля, что и продемонстрировано на примере сварного соединения наплавки. Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Обсуждаются причины самоэкранирования структурных неоднородностей на разных уровнях фиксации, обусловленные взаимным пространственным перекрытием микрообластей, излучающих волны упругих напряжений. Наибольшие проблемы идентификации дефектов для ЭНК представляют их полная или частичная экранировка. Для метода электрофизической хроматографии необходим хотя бы один экспериментальный массив, полученный из следующих измерений: двойного сканирования поверхностей объекта контроля; двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля; двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени или по частоте. В случае сканирования по одной (внешней или внутренней) поверхности координаты дефектов определяются по соответствующим поперечным сечениям и расчетными значениями их глубины с применением частотного и частотно-временного анализа.

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

Для цитирования: Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Иваний М.Б., Жидков М.Е., Томилин С.А., Козлов А.В. Представление результатов электрического контроля методом электрофизической хроматографии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):39–49. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05>

Presentation of electrical control results by electrophysical chromatography method

**Vitaly I. Surin¹  , Alexander S. Shcherban² , Alexander A. Shcherbakov¹ ,
Mikhail B. Ivanyi¹ , Maxim E. Zhidkov², Sergey A. Tomilin³ ,
Alexander V. Kozlov²**

¹ National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia² «Atommash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russia³ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

✉ VISurin@mephi.ru

Abstract. A method of electrophysical chromatography was proposed to visualize the results of electrical non-destructive testing for the first time. Surface potentiograms usually used to represent the results of scanning contact potentiometry are replaced by volumetric images of structural inhomogeneities. The alternative has obvious advantages as useful additional information can drastically change the results of testing which is demonstrated by the example of a weld overlay. Methodological recommendations for constructing volumetric images of defects are formulated and implemented. The causes of self-shielding of structural inhomogeneities at different levels of fixation which are due to the mutual spatial overlap of microregions emitting waves of elastic stresses are discussed. The biggest problems in identifying defects for NDT are their complete or partial screening. The electrophysical chromatography method requires at least one experimental array obtained from the following measurements: double scanning of the surfaces of the test object; double simultaneous scanning of the surfaces of the test object; double simultaneous scanning of the surfaces of the test object using a radiation synchronizer in time or frequency. In the case of scanning along one (external or internal) surface, the coordinates of defects are determined from the corresponding cross sections and the calculated values of their depth using frequency and time-frequency analysis.

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

For citation: Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Ivanyi M.B., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Kozlov A.V. Presentation of electrical control results by electrophysical chromatography method. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):39-49 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05>

Введение

Результаты электрического неразрушающего контроля можно представить не только поверхностными потенциограммами, но и объемными изображениями в цвете, полученными методом электрофизической хроматографии. Разработанный нами метод позволяет получать объемные изображения внутренних структурных неоднородностей в металлах с помощью функции распределения потенциалов на поверхности. Координаты неоднородностей, их размеры и форма определяются с помощью поверхностных потенциограмм, построенных механическим сканированием поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем перестраиваются в объемные изображения.

В качестве примера приводится построение объемного изображения непровара в сварном соединении трубы с наплавкой. Результаты контроля трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 методом сканирующей контактной потенциометрии (СКП) приведены в предыдущей статье авторов [1]. Контролируемым объектом являлась наплавка на трубе, представляющая собой цилиндрическую поверхность со скошенным торцом. Сканирование выполнялось по цилиндрической и торцевой поверхности наплавки. Толщина наплавленного слоя равнялась 25 мм, а его высота составляла 22 мм. Плотность точек электрического контроля при сканировании по цилиндрической поверхности была равна 10x26, по торцевой поверхности – 16x30. В целях более точного определения координат дефектов при построении объемного изображения было применено двойное сканирование выделенных участков наплавки с номерами №10 и №11 и специальная компьютерная программа. Задача заключалась в построении объемного изображения непровара по результатам сканирования.

В общем случае при электрическом контроле может использоваться дополнительно [2,3]:

- внешнее электрическое и/или магнитное поле;
- тепловой нагрев объекта контроля;

– внешнее электрическое или магнитное поле и нагрев объекта контроля одновременно.

Электрический контроль может проводиться также с использованием микрозондовых преобразователей с минимальным шагом сканирования. Для повышения эффективности контроля на практике применяются мультиметры с более высокой чувствительностью, например, с порогом чувствительности в несколько нановольт.

Описание метода и результаты построения объемного изображения дефектов

При распространении волн в средах, интенсивно поглощающих энергию, с удалением от источника происходит их постепенное затухание [4]. В металлах распространение волн механических напряжений (ВМН) сопровождается интерференцией и дифракцией [5]. В результате чего распределение потенциалов на поверхности изменяется, а на потенциограммах образуются разнообразные по форме и размерам рефлексии. Современные инструменты компьютерного дизайна позволяют окрашивать рефлексии в разные цвета, в соответствии со значениями амплитуды сигнала, что повышает наглядность представления результатов и дает важную дополнительную информацию (рис. 1).

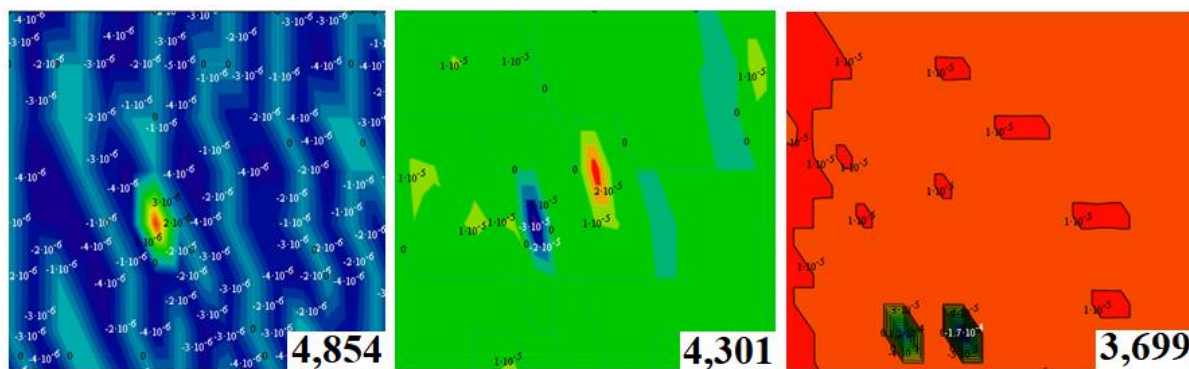


Рисунок 1. Фрагменты поверхностных потенциограмм с рефлексиями от следующих дефектов (слева направо): зародыш микроскопической трещины; сингулярность в сварном соединении; шлаковое скопление в сварном соединении

Figure 1. Fragments of surface potentiograms with reflections from the following defects (from left to right): the nucleus of a microscopic crack; singularity in a welded joint; slag accumulation in a welded joint

Затухание, связанное с поглощением механической энергии, заметно проявляется в массивных образцах и сварных соединениях толщиной 50 мм и более¹.

На потенциограммах также наблюдается эффект экранирования изображений дефектов, находящихся в разных объемных слоях металла и излучающих волны различной амплитуды. Изображения на высоких уровнях фиксации экранируются изображениями дефектов низких уровней. Этот эффект продемонстрирован на рисунке 2.

¹ 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, В.И. Сурин, З.С. Волкова, А.А. Абу Газал, А.И. Алвахеба и др. // Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ, 2017, регистрационный номер АААА-А19-119032190046-8, 118 с.

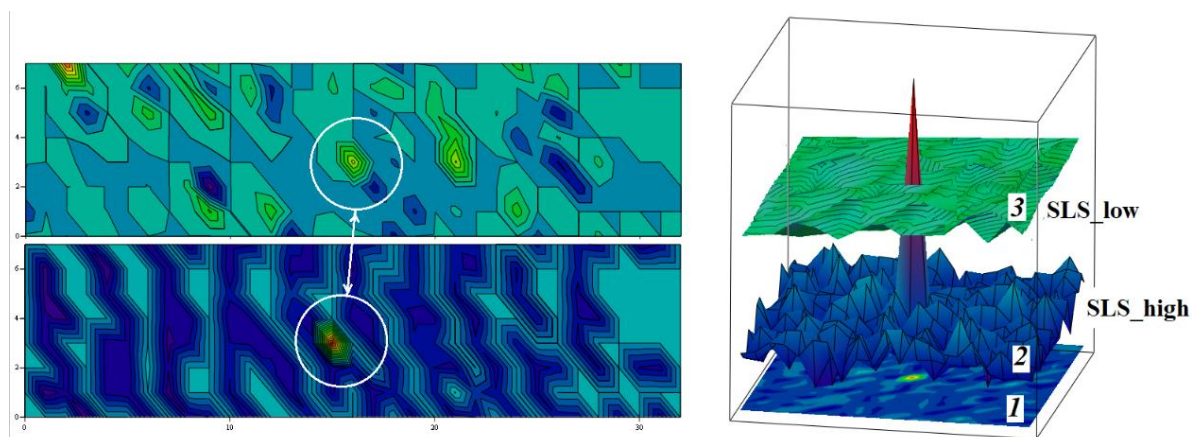


Рисунок 2. Эффект самоэкранирования дефектов на разных структурных уровнях: слева – поверхностные потенциограммы с рефлексом зародыша трещины на уровне фиксации $SLS=2$ (вверху) и $SLS=4,854$ (внизу); справа – 1) потенциограмма с зародышем трещины, 2) объемная потенциограмма данного дефекта на высоком уровне фиксации, 3) объемная потенциограмма данного дефекта на низком уровне фиксации

Figure 2. The effect of defect self-shielding at different structural levels: on the left - surface potentiograms with a crack-nucleus reflection at the fixation level $SLS=2$ (top) and $SLS=4.854$ (bottom); on the right - 1) potentiogram with a crack nucleus, 2) volumetric potentiogram of this defect at a high fixation level, 3) volumetric potentiogram of this defect at a low fixation level

С левой стороны рисунка 2 видно, что на низком уровне фиксации для $SLS=2$ зародыш трещины, выделенный в белый круг, однозначно идентифицировать сложно, поскольку на потенциограмме присутствуют похожие по размерам, форме и цвету рефлексy. На высоком же уровне фиксации для $SLS=4,854$ координаты зародыша трещины определяются однозначно [6].

На рисунке 3 показаны примеры трех видов взаимного самоэкранирования неоднородностей: полное, частичное и условное. Экранирование обусловлено взаимным пространственным перекрытием областей излучения волн упругих напряжений (деформаций) или областей Сен-Венана. Частичное перекрытие (или частичное наложение рефлексов на потенциограммах) легко определяется по их цветовой гамме и расположению. Область условного экранирования на потенциограммах бывает окружена темной замкнутой линией, разделяющей изопотенциальные участки потенциограммы. Такой же внешний контур имеют и одиночные рефлексy. Контурное выделение рефлексов и другие функции визуализации регулируется параметрами программы для обработки изображений.

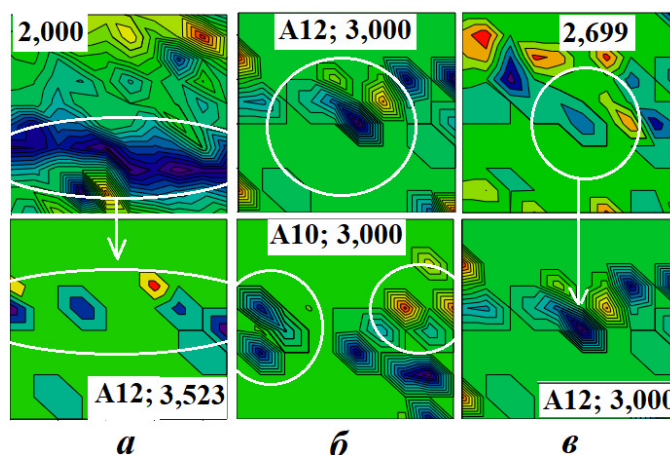


Рисунок 3. Примеры полного (а), частичного или перекрывающегося (б) и условного (в) экранирования неоднородностей

Figure 3. Examples of full (a), partial or overlapping (b) and conditional (c) screening of inhomogeneities

Интерференционные эффекты наблюдаются в том случае, когда излучение подповерхностных дефектов имеет высокую спектральную плотность мощности и поэтому проявляются в широком интервале уровней фиксации. Несколько отдельных дефектов с высокой спектральной плотностью мощности создают на поверхности один общий рефлекс, как правило, протяженный по форме с глубоким насыщенным цветом. Наиболее сложный случай разделения дефектов по глубине возникает при близком расположении источников, имеющих близкие значения мощности излучения.

Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Координаты дефектов в объеме определяются графически по результатам следующих измерений:

- двойного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени или по частоте.

В случае сканирования по одной (внешней или внутренней) поверхности координаты дефектов определяются координатами соответствующих поперечных сечений и расчетными значениями их глубины.

Полученные результаты двойного сканирования анализируются на разных уровнях фиксации. Для этого также применяются методы частотно-временного анализа и интегральное преобразование Фурье [7].

Виды дефектов определяется следующими способами:

- расчетом полей упругих напряжений внутри области Сен-Венана;
- методом частотно-временного анализа и преобразованием Фурье;
- оценкой влияния эффекта экранирования;
- расчетом функции спектральной плотности мощности;
- анализом геометрических размеров области Сен-Венана, а также формы и других параметров;
- итоговым сопоставлением новых потенциограмм с архивными данными лаборатории ФЭДНК ИЯФиТ [8,9].

Причина возникновения и распространения ВМН связана с релаксацией внутренних напряжений в объеме образца. Упругие волны воздействуют на поверхность контакта и вызывают локальные упругие смещения среды. Как правило, такие процессы на временной зависимости амплитуды сигнала регистрируются преобразователем в виде δ – функций и характеризуются высокими значениями амплитуды. Процессы, приводящие к деформационному упрочению, связаны с движением дислокаций. В этом случае часть образовавшихся дислокаций достигает поверхности образца, образуя на ней дислокационные ступеньки. Ступеньки взаимодействуют с поверхностью преобразователя, увеличивая число и площадь пятен электрического контакта. Чем активнее протекают деформационные процессы, тем более заметный по амплитуде сигнал будет сформирован на выходе электрофизического преобразователя.

В соответствии с теоремой Парсеваля [10], мощность источника внутренних механических напряжений определяется интегральной функцией E_{mech} , формула (1):

$$E_{mesh} = \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi(t))^2 dt. \quad (1)$$

Значение функции пропорционально той части механической энергии, которая поглощается электронной системой. Поглощенная электронами энергия влияет на локальную работу выхода и интенсифицирует процессы электронных переходов между металлами. Разделив правую часть выражения (1) на величину временного интервала Δt

($\Delta t = t_2 - t_1$), обычно равного времени измерения, получим другую характеристику для источников ВМН – W , формула (2):

$$W = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} (\Delta \varphi(t))^2 dt. \quad (2)$$

Согласно следствию теоремы Парсеваля величина W есть средняя мощность чисто резистивной нагрузки, численно равной 1 Ом, к концам которой приложено электрическое напряжение $\Delta \varphi$. В методе СКП напряжение $\Delta \varphi$ представляет собой дифференциальную контактную разность потенциалов, зависящую от работы выхода электронов.

В таблице 1 показаны значения мощности источников, рассчитанные по формуле (2). Приведенные в таблице данные подтверждаются сравнением и идентификацией дефектов другими методами неразрушающего контроля.

Таблица 1. Значения мощности источников ВМН в зависимости от уровня фиксации дефекта
Table 1. Power values of mechanical stress wave sources depending on the defect fixation level

Уровень фиксации	Мощность, Вт	Примеры источников
0	1	Точечная поверхностная коррозия, следы механической обработки поверхности
1	10^{-2}	Проникающая коррозия, поверхностные и объемные дефекты
2	10^{-4}	Стенки отверстий и канавки фрезеровки в металлах после механического сверления и фрезерования; очаги усталостного разрушения в объеме
3	10^{-6}	Очаги механических разрывов и усталостного разрушения
4	10^{-8}	Зародышевые трещины, непровары
5	10^{-10}	Зоны образующегося мартенсита, фазовые переходы, зародышевые трещины, полосы Чернова-Людерса
6	10^{-12}	Спаренные дефекты, скопления и кластерные образования
7	10^{-14}	Отдельные, глубокорасположенные в объеме дефекты

Для расчета коэффициента экранирования электрического сигнала K_{sc} в единицах децибел, получено выражение (3) [11]:

$$K_{sc} = 10 \lg \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right)^2, \quad (3)$$

где φ_1 – амплитуда электрического сигнала до экрана, φ_2 – амплитуда электрического сигнала после экрана.

Для рисунка 3 коэффициенты экранирования электрического сигнала K_{sc} соответственно равны 23,4 (а) и 1,0 (б). Для случая б отсутствует взаимное экранирование рефлексов и поэтому K_{sc} близко к нулевому значению. На рисунке 2 приведен пример условного экранирования.

Как было показано авторами данной статьи в опубликованной ранее работе «Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении» [1], линии непровара в наплавке наиболее отчетливо видны на потенциограммах у основания наплавки, полученных для цилиндрической поверхности участка № 11 на уровнях фиксации, начиная с SLS=4 (рис. 4). Рефлексы на потенциограммах указывают на частичный непровар, допущенный сварщиком при послойном наплавлении металла. При этом образуются локальные участки отдельных непроваров, три из которых наиболее заметны на потенциограмме (SLS=3,523). При их детальном изучении можно сделать вывод, что протяженный при сканировании по цилиндрической поверхности рефлекс состоит из

отдельных частей. На разной глубине наблюдается три локальных непровара в интервале $SLS=4,699 - 5,26$.

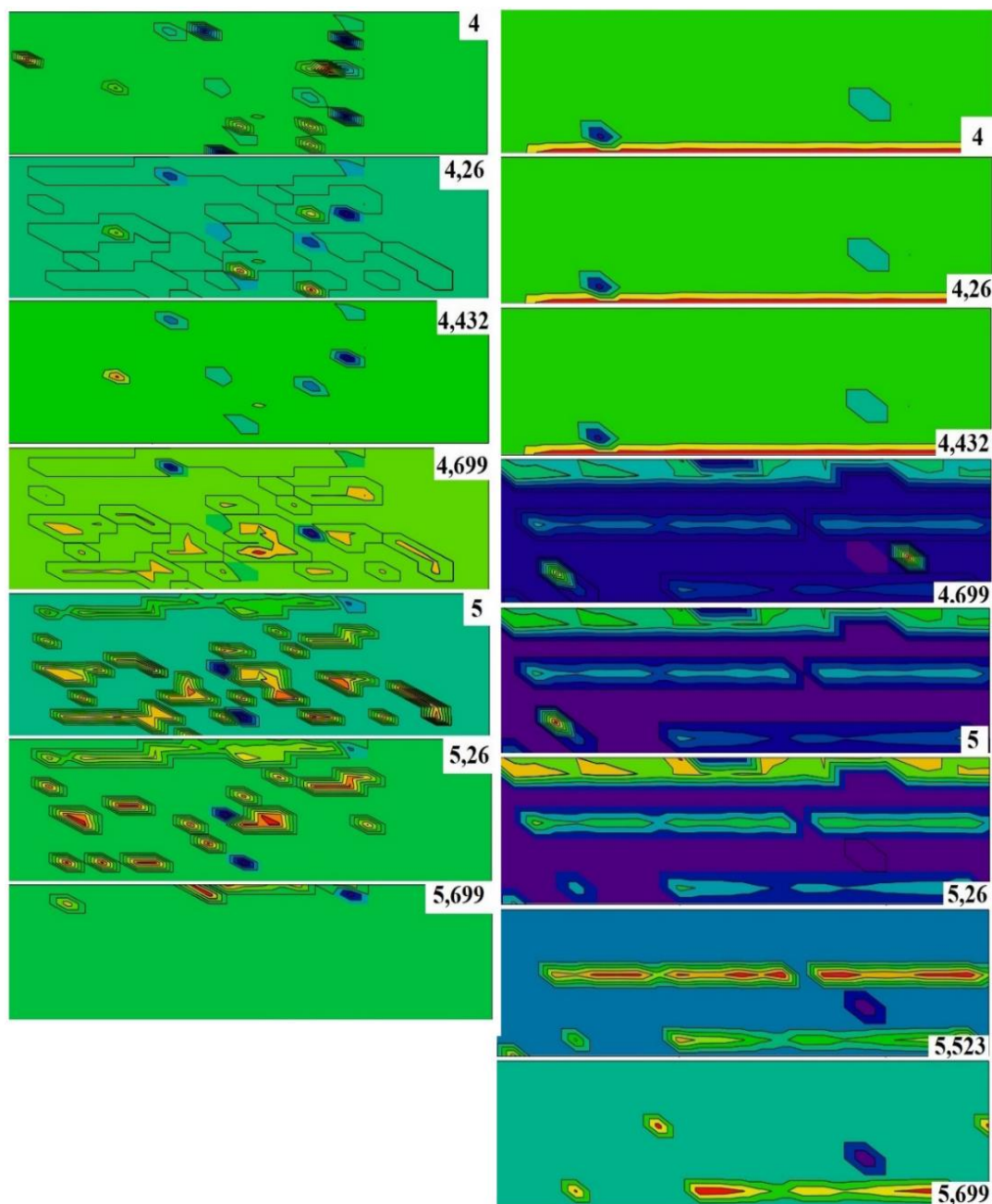


Рисунок 4. Потенциограммы трубы с наплавкой: слева – сканирование по торцевой поверхности, справа – сканирование по цилиндрической поверхности

Figure 4. Welded pipe potentiograms: on the left - scanning along the end surface, on the right - scanning along the cylindrical surface

Наиболее заметный по уровню мощности излучения непровар располагается в нижней части наплавки ($W= 10^{-8}$ Вт). Непровар, который на уровне фиксации $SLS=4$ (рис. 4) представляет собой тонкую протяженную полосу (рефлекс красного цвета), на более высоких уровнях фиксации вследствие эффекта условного экранирования трансформируется в несколько локальных непроваров ($SLS=5,699$).

На рисунке 6 приведен пример объемного представления непровара по толщине трубы с наплавкой в представлении поверхностных потенциалов на разных уровнях фиксации. Изображение построено с помощью результатов (рис. 5), полученных с шагом амплитудного дискриминатора, равного 10^{-6} В.

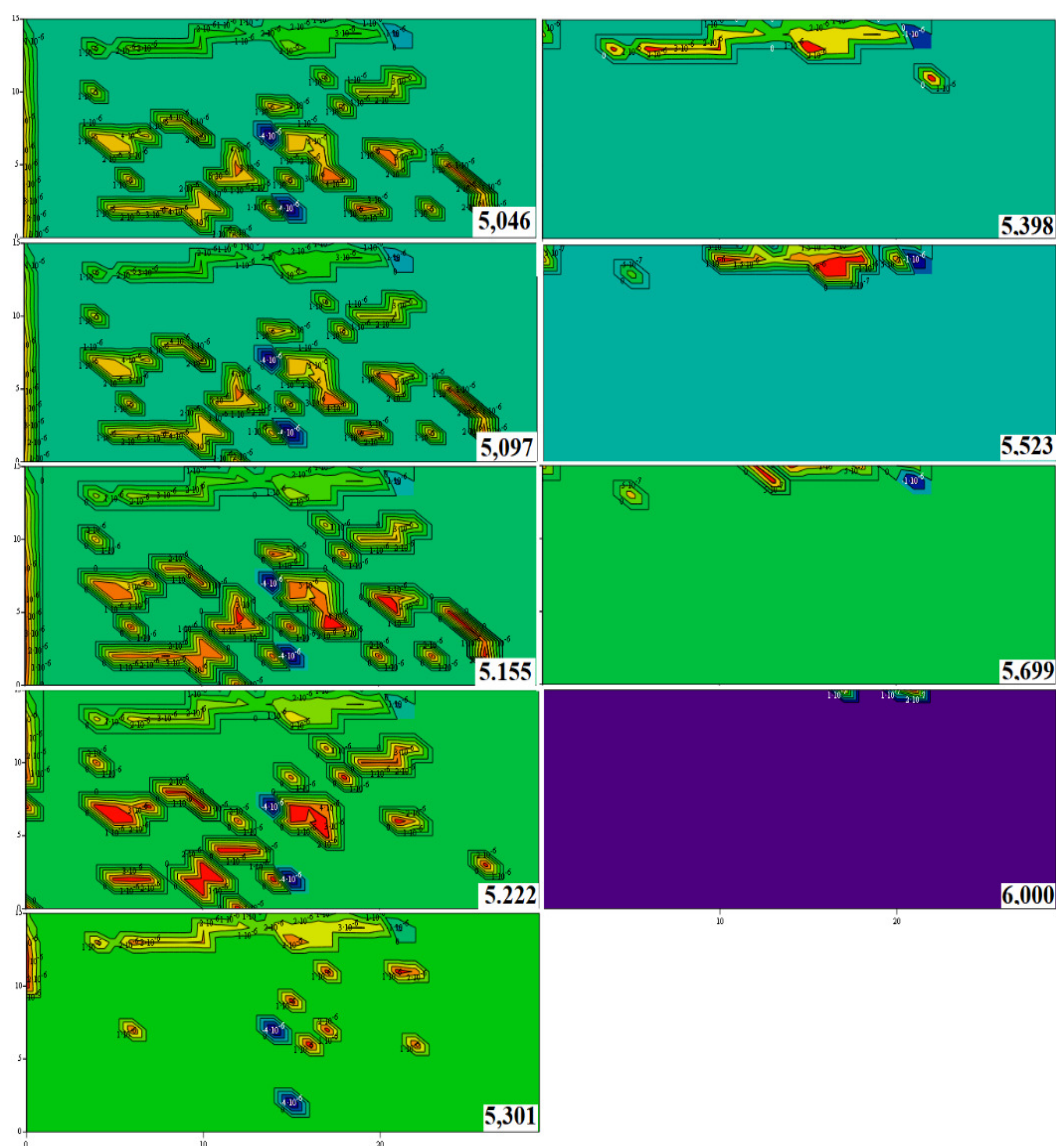


Рисунок 5. Детализация дефектов сварного соединения на участке №11 по результатам сканирования торцевой поверхности

Figure 5. Detailing of defects in the welded joint in section No. 11 based on the results of scanning the end surface

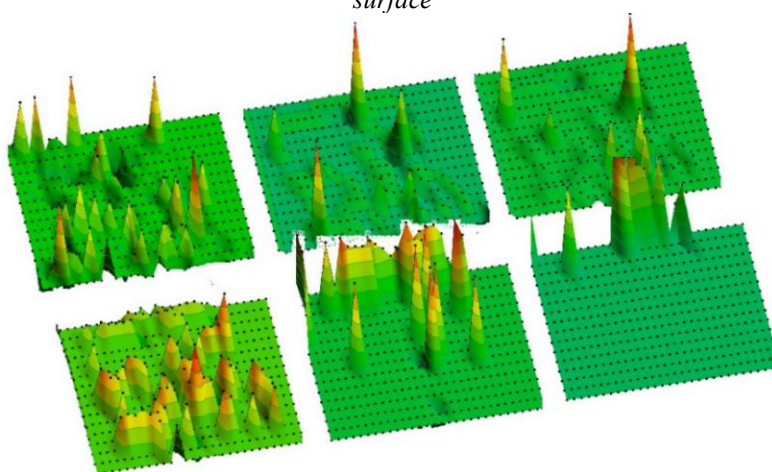


Рисунок 6. Объемное представление непровара по толщине трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 в представлении поверхностных потенциалов при разных уровнях фиксации: верхний ряд слева направо SLS – 2.523, 3.699, 4.000; нижний ряд – 4.509, 5.301, 5.699

Figure 6. Volumetric representation of lack of penetration across the thickness of the pipe with surfacing "I", No. 5, AM 117.03.02.540 in the representation of surface potentials at different levels of fixation: top row from left to right SLS - 2.523, 3.699, 4.000; bottom row - 4.509, 5.301, 5.699

Заключение

Метод электрофизической хроматографии позволяет представлять поверхностные и внутренние объемные дефекты в металлах с высоким пространственным разрешением.

Приведен пример объемного представления непровара по толщине заводской трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 в представлении поверхностных потенциалов на разных уровнях фиксации.

Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Локация дефектов в объеме осуществляется по результатам следующих измерений:

- двойного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени и/или по частоте.

Установлено три вида самоэкранирования неоднородностей в объеме металла: полное, частичное и условное. Экранирование обусловлено взаимным пространственным перекрытием областей, излучающих волны упругих напряжений (деформаций). Частичное перекрытие или частичное наложение рефлексов на потенциограммах определяется по их цветовой гамме и расположению. Область условного экранирования на потенциограммах, как правило, окружена замкнутой линией, разделяющей изопотенциальные участки потенциограммы. Контурное выделение рефлексов и другие функции визуализации можно регулировать параметрами программы для обработки изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А. и др. Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;(1):36–53. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>
2. Сурин В.И., Волкова З.С., Денисов Р.А., Мотовилин В.Д., Рейн Н.В. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;(4):51–62. URL: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2016.4.pdf> (дата обращения: 10.03.2023)
3. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Шеф Е.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Автоматизация электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов. *Автоматизация в промышленности*. 2019;(2):48–51. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2019.02.11>
4. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. Москва : Издательство стандартов; 1976. 272 с.
5. Алвахеба А. И., Сурин В.И., Бекетов В.Г., Иванов О.В., Иванова Т.Е. Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений модельных образцов. В кн.: *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018): Труды XVIII Международной молодежной конференции*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2018. С. 179–180. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979736_11029641.pdf (дата обращения: 10.03.2023). EDN: YXJYAH
6. Сурин В.И., Польский В.И., Осинцев А.В., Джумаев П.С. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях. *Дефектоскопия*. 2019;(1):53–60. <https://doi.org/10.1134/S01303082190100081>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>
8. Морозов А.А., Сурин В.И., Батухтин Е.А., Зорина Т.Н. Информационное обеспечение электрофизического метода исследования поверхности материалов. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2011(3):59–65. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159CachedSimilar%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2&ELEMENT_ID=7943 (дата обращения: 10.03.2023)

9. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment. *Nuclear Energy for New Europe 2010. Book of Abstracts. Slovenia*; 2010. P. 58-59. URL: <https://arhiv.djs.si/port2010/htm/abs/absPORT20102754.html> (дата обращения: 10.03.2023)

10. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : Перевод с англ. Москва: Связь; 1980. 248 с.

11. Сурин В.И., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Исследование очагов деформационного упрочнения в сплаве Д16Т на дефектах механической обработки поверхности. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2022;(1):34–44.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Сурин В.И. – научное руководство проектом, участие в экспериментах;

Щербань А.С. – разработка методической части исследований, организация экспериментальных работ и участие в них;

Щербаков А.А. – обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и результатов исследования к опубликованию;

Иванич М.Б. – анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и текста научной статьи к опубликованию;

Жидков М.Е. – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения;

Томилин С.А. – информационное обеспечение научного исследования, подготовка и опубликование результатов исследования;

Козлов А.В. – ресурсное обеспечение экспериментального исследования, подготовка и опубликование результатов исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виталий Иванович Сурин, к.т.н., заведующий лабораторией функциональной электрофизической диагностики и неразрушающего контроля института ядерной физики и технологий (ИЯФТ), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6153-0206> ; e-mail: VISurin@mephi.ru

Александр Сергеевич Щербань, начальник отдела методов неразрушающего контроля, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8619-4455> ; e-mail: shcherban_as@atom mash.ru

Александр Антонович Щербаков, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1313-8829> ; e-mail: AASherbakov@mephi.ru

Михаил Борисович Иванич, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9574-9165> ; e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

Максим Евгеньевич Жидков, директор филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: zhidkov_me@atom mash.ru

Сергей Алексеевич Томилин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Surin V.I. – scientific management of the project, participation in experiments;

Shcherban A.S. – development of the methodological part of research, organization of experimental work and participation in them;

Shcherbakov A.A. – processing and analysis of experimental data, preparation of the conclusion and results of the study for publication;

Ivany M.B. – analysis of experimental data, preparation of a conclusion and text of a scientific article for publication;

Zhidkov M.E. – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion;

Tomilin S.A. – information support of scientific research, preparation and publication of research results;

Kozlov A.V. – resource support for experimental research, preparation and publication of research results.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vitaly I. Surin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Functional Electrophysical Diagnostics and Non-Destructive Testing Laboratory, Institute of Nuclear Physics and Technology (INPhT), National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6153-0206> ; e-mail: VISurin@mephi.ru

Alexander S. Shcherban, Head of Non-Destructive Testing Department, «Atom mash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8619-4455> ; e-mail: shcherban_as@atom mash.ru

Alexander A. Shcherbakov, graduate student, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1313-8829> ; e-mail: AASherbakov@mephi.ru

Mikhail B. Ivanyi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1313-8829> ; e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

Maxim E. Zhidkov, Head of the Atom mash branch of AEM-technologies JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: zhidkov_me@atom mash.ru

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical

институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386> ; e-mail: SATomilin@mephi.ru

Александр Викторович Козлов, директор по производству, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: kozlov_av@atommash.ru

Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386> ; e-mail: SATomilin@mephi.ru

Alexander V. Kozlov, Head of Production, «Atom mash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: kozlov_av@atommash.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023

После доработки 22.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

Received 27.03.2023

Revision 22.05.2023

Accepted 30.05.2023