

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

УДК 620.179.13: 621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>

EDN QWREXO

Оригинальная статья / Original paper



Градиентный метод идентификации структурных неоднородностей
в электрическом контроле оборудования, изделий и материалов

В.И. Сурин¹  , М.Б. Иванов¹ , А.А. Щербаков¹ , А.С. Щербань² ,
А.В. Павличенко², С.А. Томилин³ , М.Е. Жидков², А.Э. Гок²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

² Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Российская Федерация

³ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация

 VIsurin@mephi.ru

Аннотация. Разработан градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в объектах контроля промышленного оборудования и изделий на основе анализа распределения электрического потенциала внутри одиночного рефлекса. Расчетно-графический метод был применен для анализа результатов электрического контроля оборудования АЭС при его изготовлении. Рассматриваемая цель исследования заключалась в определении степени воспроизводимости результатов электрического контроля и разработке для этого универсального цифрового идентификатора структурных неоднородностей. Одиночные рефлексы характеризуются внутренним давлением и распределением электрического потенциала, который имеет градиент. На потенциограммах одиночные рефлексы выделяли методом электрофизической хроматографии с помощью двойной амплитудной дискриминации по разработанным программным кодам. Возникновение картин распределения потенциалов на поверхности контролируемого изделия связано с наличием в нем неоднородных полей внутренних напряжений и деформаций. Для определения локального значения внутреннего давления в структурных неоднородностях оценивали значение плотности энергии. Эту оценку для одиночных рефлексов получали, используя значение плотности электронов в металлах и сплавах. Величина градиента соответствует напряженности электрического поля вокруг рефлекса. На поверхности одиночный рефлекс представляет собой фигуру из концентрических шестиугольников или других геометрических фигур. В объемном изображении рефлекс имеет вид пирамиды, в основании которой заключена определенная фигура. Шестиугольная форма рефлекса связана с квазиравновесным распределением нормальных и касательных напряжений вокруг точечной неоднородности. Для уровня фиксации в интервале ($0 \leq SLS < 1$) значение внутреннего давления в сталях близко к пределу прочности, для интервала отрицательных значений ($-0,7 \leq SLS < -0,4$) – к пределу текучести.

Ключевые слова: электрический неразрушающий контроль, электрофизическая хроматография, протяженные и одиночные рефлексы,

Для цитирования: Сурин В.И., Иванов М.Б., Щербаков А.А., Щербань А.С., Павличенко А.В., Томилин С.А., Жидков М.Е., Гок А.Э. Градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в электрическом контроле оборудования, изделий и материалов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):34–41. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>

For citation: Surin V.I., Ivanov M.B., Shcherbakov A.A., Shcherban A.S., Pavlichenko A.V., Tomilin S.A., Zhidkov M.E., Gok A.E. Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):34–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>

Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials

Vitaly I. Surin¹  , Mikhail B. Ivanyi¹ , Alexander A. Shcherbakov¹ ,
Alexander S. Shcherban² , Alexander V. Pavlichenko², Sergey A. Tomilin³ ,
Maxim E. Zhidkov², Andrey E. Gook²

¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

²«Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC, Volgograd, Rostov region, Russian Federation

³Volgograd Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgograd, Rostov region, Russian Federation

 VISurin@mephi.ru

Abstract. A gradient method of structural inhomogeneities identification in the objects of industrial equipment and products control based on the analysis of electric potential distribution inside a single reflex is developed. The computational and graphic method is applied to analyze the results of electrical control of NPP equipment during its manufacture. The research objective under consideration is to determine the degree of reproducibility of electrical inspection results and to develop for this purpose a universal digital identifier of structural inhomogeneities. Single reflexes are characterized by internal pressure and distribution of electric potential, which has a gradient. Single reflexes on potentiograms are isolated by electrophysical chromatography with the help of double amplitude discrimination using developed program codes. The emergence of potential distribution patterns on the surface of the controlled product is associated with the presence of inhomogeneous fields of internal stresses and deformations in it. To determine the local value of internal pressure in structural inhomogeneities, the value of energy density was estimated. This estimation for single reflexes is obtained using the value of electron density in metals and alloys. The magnitude of the gradient corresponds to the electric field strength around the reflex. On the surface, a single reflex represents a figure of concentric hexagons or other geometric figures. In the volumetric image, the reflex has the form of a pyramid with a certain figure at its base. The hexagonal shape of the reflex is associated with a quasi-equilibrium distribution of normal and tangential stresses around the point heterogeneity. The value of internal pressure in steels for the fixation level in the interval ($0 \leq \text{SLS} < 1$) is close to the strength limit, for the interval of negative values ($-0,7 \leq \text{SLS} < -0,4$) – to the yield strength.

Keywords: electrical nondestructive testing, electrophysical chromatography, extended and single reflexes.

Введение

Практическое использование метода сканирующей контактной потенциометрии на промышленных предприятиях Российской Федерации говорит о необходимости разработки универсального цифрового каталога или идентификатора в целях быстрого и эффективного определения характеристик обнаруживаемых дефектов. В особой степени важности этот вопрос касается предприятий атомного энергетического машиностроения и ряда других высокотехнологичных отраслей промышленности.

Результаты электрофизических измерений показывают, что рефлексы от протяженных структурных неоднородностей, таких как непровар корня сварного соединения, смещение кромок свариваемых поверхностей или шлифовальные полосы на поверхности представляют собой объединение многих одиночных рефлексов. Применение математических методов обработки результатов

контроля позволяет выделить и подробно исследовать эти типы рефлексов.

По определению градиент поля на поверхности определяется выражением (1):

$$\text{grad}\varphi(x, y) = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \mathbf{j}, \quad (1)$$

где $\mathbf{i}$ и $\mathbf{j}$ – единичные векторы вдоль осей x и y . Величина градиента в каждой точке поверхности описывается выражением (2):

$$|\text{grad}\varphi| = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2}. \quad (2)$$

В общем виде напряженность электрического поля удовлетворяет уравнению Максвелла (3) [1]:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}, \quad (3)$$

где второй член справа соответствует производной векторного потенциала $\mathbf{A}$ по времени.

Поскольку скорость сканирования составляет несколько миллиметров в секунду, релятивистскими эффектами и влиянием второго члена в выражении (3) можно пренебречь.

В соответствии с теорией контактной потенциометрии [2] на распределение потенциала в области точечного рефлекса влияют следующие факторы:

- электрическое и магнитное поле;
- волны механических напряжений;
- автоволновые процессы.

Причинно-следственная связь возникновения электрических рефлексов объясняется неоднородной поверхностной деформацией, возникающей под действием внешней нагрузки.

Напряженность электрического поля на поверхности образца, так же, как и электрический потенциал демонстрирует крайне неоднородный характер. Дивергенция напряженности электрического поля в точке с условными координатами (x_0, y_0) определяется выражением (4):

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y}. \quad (4)$$

Внутри одиночного рефлекса имеет место определенное распределение потенциала.

Исследование структурных неоднородностей при полном разделении рефлексов

На рисунке 1 с левой стороны показан рефлекс равновесной микроскопической трещины [3].

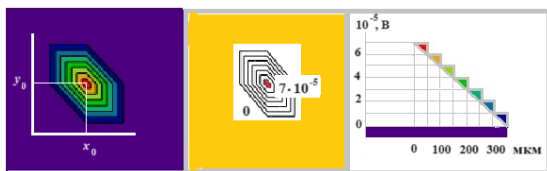


Рисунок 1. Рефлекс микроскопической трещины (слева), распределение электрического потенциала внутри рефлекса (в центре) и цветовая градиентная лестница изменения потенциала в зависимости от расстояния (справа)

Figure 1. Microscopic crack reflex (left), electric potential distribution within the reflex (centre) and colour gradient staircase of potential change as a function of distance (right)

В средней части рисунка 1 показано распределение потенциала внутри фигуры с максимальным значением « $7 \cdot 10^{-5}$ В» в ее центре, и нулевым значением на периферии. Справа показаны ступеньки цветовой градиентной лестницы изменений потенциала в зависимости от расстояния x . Лестница может иметь различное число ступенек. Как следует из приведенных рисунков электри-

ческий потенциал на поверхности является функцией координат $\varphi(x, y)$.

Потенциал уменьшается от центра фигуры к ее периферии на величину, примерно равную, 10 мкВ на 50 мкм длины ступеньки, как вдоль оси x , так и вдоль оси y , или, другими словами, падение потенциала от центра к периферии составляет 70 мкВ на 350 мкм.

Для зародышевой трещины в тонкой пластине распределение потенциала двумерно. Для объемных тел и распределение потенциала и напряженность электрического поля будут зависеть от трехмерных пространственных координат (x, y, z) . Результаты электрофизической томографии показывают, что протяженные неоднородности в объемных образцах проецируются на внешние поверхности в виде двумерных геометрических фигур.

В соответствии с выражениями (1) и (2) для рефлекса микротрещины получим в системе СИ:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \approx \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Поскольку $\partial \varphi / \partial x = \partial \varphi / \partial y$, значение модуля градиента $|\operatorname{grad} \varphi| = 0,28 \text{ В/м}$. На рисунке 1 вектор направлен от фиолетовой области рефлекса к красному центру.

В данном случае дивергенция имеет положительное значение, поскольку в центре рефлекса находится точечный источник электрического поля и поэтому расхождение больше нуля.

Для определения локального значения внутреннего давления в структурных неоднородностях необходимо знать соответствующее значение плотности энергии. Энергия основного состояния системы взаимодействующего неоднородного электронного газа E_S имеет вид выражения (5) [4,5]:

$$E_S = \int \psi(\mathbf{r}) n(\mathbf{r}) d\mathbf{r} + \frac{1}{2} \iint [n(\mathbf{r}) n(\mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|] \times \\ \times d\mathbf{r} \times d\mathbf{r}' + G[n], \quad (5)$$

где $n(\mathbf{r})$ – плотность электронов в некоторой точке кристаллической решетки;

$\psi(\mathbf{r})$ – внешний статический потенциал;

$G[n]$ – функционал электронной плотности, который имеет различные приближения в зависимости от поставленной задачи. Данное уравнение решается методом последовательных итераций и позволяет получать удо-

влетворительные результаты в различных приложениях.

Будем использовать приближение Томаса-Ферми для неоднородного электронного газа [6], в котором величина внутриатомного давления p в объеме dv определяется выражением (6):

$$p = -\frac{dE_V}{dv}, \quad (6)$$

где E_V – энергия электронов в заключенном объеме.

Внутреннее давление связано с объемной плотностью энергии и имеет следующие оценки для металлов. Для упругой деформации «сжатия – растяжения» плотность упругой энергии описывается формулой (7):

$$U_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{упр}} \cdot \varepsilon^2}{2}, \quad (7)$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости;

ε – относительная деформация.

Плотность кинетической энергии T электронного газа с энергией Ферми ε_F при температуре абсолютного нуля описывается выражением (8) [7]:

$$T = \frac{3}{5} n \varepsilon_F. \quad (8)$$

Используя результаты предшествующих исследований [8], можно показать, что в области структурной неоднородности величина давления, или внутреннего напряжения, является функцией электрического потенциала, выражение (9):

$$p(\varphi) = en\varphi, \quad (9)$$

где e – заряд электрона;

n – плотность электронов.

При этом предполагается, что при деформировании рассматриваемый объем не изменяется. Поскольку источники отличаются мощностью излучения, для величины потенциала необходимо указывать уровень фиксации, выражение (10):

$$p(\varphi_{SLS}) = en\varphi_{SLS}, \quad (10)$$

или в другой форме записи, выражение (11):

$$p_{SLS} = en\varphi_{SLS}. \quad (11)$$

Оценку внутреннего давления для одиночных рефлексов можно получить, используя плотность электронов в металлах и сплавах $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ [8]. Для уровня фиксации в интервале ($0 \leq SLS < 1$) значение внутреннего давления в сталях близко к пределу прочности, для интервала отрицательных значений ($-0,7 \leq SLS < -0,4$) – к пределу текучести, где $SLS = \lg \varphi$ и значение φ в вольтах. В таблице 1

сравниваются расчетные значения плотности энергии, полученные с помощью выражений (7)–(11).

Таблица 1. Плотность энергии в металлах, МДж/м³ (МПа)

Table 1. Energy density in metals, MJ/m³ (MPa)

Растяжение-сжатие в упругой области	Электронный газ при нуле Кельвина	Структурная неоднородность
0,001	600	SLS = -1: 160
		SLS = -0,7: 320
		SLS = -0,5: 480

Семейства рефлексов, образующихся в результате шлифования поверхности сварного соединения

На рисунке 2а показана потенциограмма сварного соединения двух стальных пластин (сталь 12Х18Н10Т), толщиной 13,5 мм, выполненного ручной дуговой сваркой [9,10]. На потенциограмме видны две полосы с левой и правой стороны. Полосы относятся к типу рефлексов «горка».

При внимательном рассмотрении узкой центральной красно-оранжевой полосы, в левой части потенциограммы, можно заметить, что небольшие участки полосы красного цвета при увеличении уровня фиксации образуют отдельные одиночные рефлексы. То же самое можно сказать и про узкую оранжево-желтую полосу в центральной части потенциограммы. Таким образом, с увеличением уровня фиксации полоса распадается на отдельные рефлексy, принадлежащие одной группе или одному семейству рефлексов, поскольку они образованы в результате шлифования поверхности.

Применяя узкополосную фильтрацию, начиная с интервала $SLS = 3,004–3,699$, можно определить и число отдельных структурных неоднородностей, принадлежащих данному семейству рефлексов.

В правой части нижнего рисунка 2в показаны две группы одиночных рефлексов, принадлежащих различным семействам. Рефлексy, расположенные ближе к продольной оси сварного соединения, имеют положительные значения потенциала и относятся к семейству рефлексов полосы шлифования. Три рефлексy, расположенные ниже и правее, характеризуются отрицательными значениями потенциала и принадлежат другому

семейству. Наблюдается также и перекрытие некоторых рефлексов.

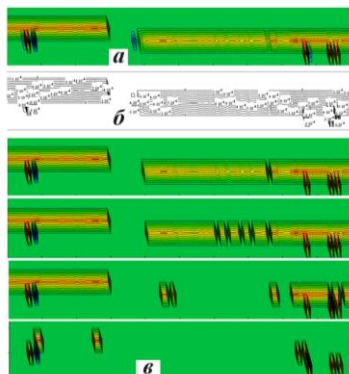


Рисунок 2. Потенциограмма полосы, образованной на поверхности сварного соединения в результате шлифования (а); карта электрических потенциалов (б); разделение полосы на отдельные точечные рефлекс (в)

Figure 2. Potentiogram of the strip formed on the surface of the welded joint as a result of grinding (a); electric potential map (b); separation of the strip into separate point reflexes (c)

Распределение потенциала внутри рефлекса семейства полосы шлифования показано на рисунке 3.

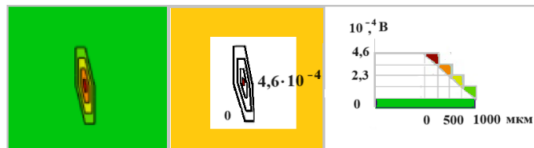


Рисунок 3. Одиночный рефлекс, образованный шлифованием сварного соединения (слева), распределение электрического потенциала внутри рефлекса (в центре) и цветовая лестница изменения потенциала в зависимости от расстояния (справа)

Figure 3. Single reflex formed by grinding a welded joint (left), distribution of electric potential within the reflex (centre) and colour ladder of potential change as a function of distance (right)

Как видно из рисунка потенциал по оси x уменьшается от центра к периферии на величину, примерно $1,15 \cdot 10^{-4}$ В на 250 мкм длины ступеньки. По оси y падение потенциала от центра к периферии составляет $1,15 \cdot 10^{-4}$ В на 1,5 мм длины соответствующей ступеньки. Таким образом, в соответствии с выражением (2) получим:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0,46 \text{ В/м}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0,077 \text{ В/м}, \\ \text{и } |\text{grad} \phi| = 0,47 \text{ В/м}.$$

Волнистость и шероховатость поверхности являются главными параметрами, влияющими на распределение электрического потенциала. Среднее значение параметра

шероховатости на шлифованной поверхности сварного соединения составляет $Ra = 1,299$ мкм.

Градиенты потенциалов были рассчитаны для потенциограмм, полученных в работах [11–13]. На рисунке 4 приводятся результаты контроля сварного соединения, выполненного сваркой трением. Так же, как и в предыдущем случае на потенциограмме видна широкая полоса, которая относится к типу рефлексов «горка-впадина», поскольку ниже полосы располагаются обширные темные пятна с отрицательными значениями потенциала (рис. 4а). Одиночные рефлекс можно также разделить на два типа «пирамиду» и «воронку».

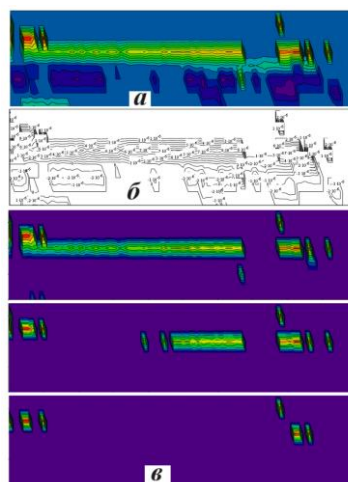


Рисунок 4. То же, что на рисунке 1 для образца со сварным швом, выполненным сваркой трением.

Интервал уровней фиксации SLS=5-5,699

Figure 4. Same as Figure 1 for a sample with a friction weld. Interval of fixation levels SLS=5-5,699

Продлав аналогичную процедуру для сварного соединения, выполненного сваркой трением (рис. 5), получим:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0,016 \text{ В/м}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0,004 \text{ В/м}, \\ \text{и } |\text{grad} \phi| \approx 0,016 \text{ В/м}.$$

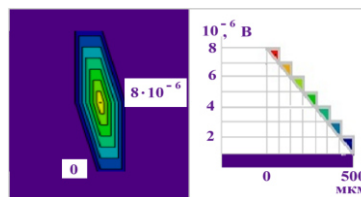


Рисунок 5. Одиночный рефлекс, образованный шлифованием соединения сваркой трением (слева) и цветовая лестница градиента потенциала (справа)

Figure 5. Single reflex formed by grinding the joint by friction welding (left) and colour ladder of the potential gradient (right)

Для данной сварки среднее значение параметра шероховатости на шлифованной поверхности сварного соединения составляет $Ra = 0,501$ мкм. Сравнивая результаты двух сварных соединений и измеренные значения шероховатости можно сделать вывод, что с увеличением шероховатости поверхности возрастает и градиент потенциала или напряженность электрического поля вокруг рефлекса.

На рисунке 6 приведен пример непровара корня сварного соединения и характеристики одиночного рефлекса. Значение градиента в данном случае равно $|grad\phi| \approx 0,06$ В/м.

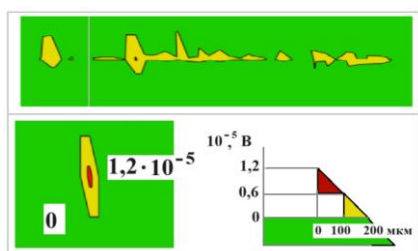


Рисунок 6. Непровар корня (вверху), одиночный рефлекс, образованный непроваром и цветовой лестница градиента потенциала (внизу)

Figure 6. Unwelded root (top), single reflex formed by the unweld and colour ladder of the potential gradient (bottom)

Заключение

Описанный градиентный метод электрофизической хроматографии позволяет идентифицировать рефлексы, происходящие от различных структурных неоднородностей, по распределению потенциала внутри них.

Для этого необходимо с помощью метода математической фильтрации разделить протяженные рефлексы, относящиеся к протяженным структурным неоднородностям, на одиночные. Протяженные рефлексы могут относиться к различным семействам: полосам шлифования, непроварам, смещению кромок сварного соединения и другим.

Одиночные рефлексы характеризуются внутренним давлением и распределение электрического потенциала, который имеет градиент. Величина градиента соответствует напряженности электрического поля вокруг рефлекса. На поверхности рефлекс представляет собой фигуру из концентрических шестиугольников. В объемном изображении рефлекс имеет вид пирамиды, в основании которой также лежит шестиугольник.

Для различных семейств рефлексов получены значения напряженности электрического поля в интервале от 0,016 до 0,47 В/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Москва: Наука, 1988. 512 с. Режим доступа: <https://djuv.online/file/7yKdiaQMEUkVZ?ysclid=m1ozwi9qqu4986992> (дата обращения: 10.09.2024).
2. Сурин В.И., Иваний М.Б., Волкова З.С., Щербаков А.А. Конструирование приборов и установок электрического неразрушающего контроля. Часть 1. Теоретические основы контактной потенциометрии. Москва: НИЯУ МИФИ, 2024. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=iknlas> (дата обращения: 07.09.2024).
3. 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. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37057859> (дата обращения: 07.09.2024).
4. Surin V.I., Polskij V.I., Osintsev A.V., Dzhumaev P.S. Applying scanning contact potentiometry for monitoring incipient cracks in steels. *Russian journal of nondestructive testing*. 2019;55(1):59–67. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38684089> (accessed: 07.09.2024).
5. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Physical Review*. 1964;136:B864–B871. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.136.B864>
6. Kohn W., Sham L.J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*. 1965;140:A1133–A1138. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.140.A1133>
7. Kohn W., Lang N.D., Lundqvist S., March N.H., Vashishta P., Bart U., Williams A.R. Theory of the inhomogeneous electron gas. New York: Plenum Press, 1983. Available at: <https://archive.org/details/theoryofinhomoge0000unse/page/n7/mode/2up> (accessed 05.09.2024).
8. Kittel Ch. Introduction to solid state physics. 8th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. Available at: <http://metal.elte.hu/~groma/Anyagtudomany/kittel.pdf> (accessed: 10.09.2024).
9. Баранов В.М., Евстюхин Н.А., Сурин В.И. К теории ЭДС, наведенной деформацией металлов и сплавов. Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-2003. 2003;9:122–124. Режим доступа: <http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2003/9/122.html> (дата обращения: 07.09.2024).

9. Alwaheba A.I., Surin V.I., Ivanova T.E., Ivanov O.V., Beketov V.G., Goshkoderov V.A. Detection of defects in a welded joint by scanning contact potentiometry. *Nondestructive testing and evaluation*. 2021;36(3):261–277. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1740702>

10. Surin V.I., Alwaheba A.I., Beketov V.G., Abu Gazal A.A. Alternative method of non-destructive testing for nuclear power plant. International conference on physics of reactors: Transition to a scalable nuclear future. *PHYSOR 2020. EPJ Web of Conferences*. 2021;247:11002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124711002>

11. Щербань А.С., Михайлевский Д.А., Павличенко А.В., Томилин С.А. Технологические особенности ультразвукового контроля сварных соединений из стали аустенитного класса марки 10X15H9C361-Ш (ЭП302-Ш). *Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции*. Том 1. Балаково, 2024. С. 194–201. Режим доступа: <https://biti.mephi.ru/wp-content/uploads/2024/07/TOM-I.pdf> (дата обращения: : 07.09.2024).

12. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербakov 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;2(47):39–49. EDN: TFDGAT. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05>

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;(2):39–49. (In Russ.). EDN: TFDGAT. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05>

13. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербakov 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;13(1):36–53. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>

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;13(1):36–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Сурин В.И. – формулировка идеи и целей исследования, участие в планировании и проведении исследований;

Иваний М.Б. – метрологическое обеспечение результатов исследования, разработка математической модели;

Щербakov А.А. – первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов и подготовка заключения;

Щербань А.С. – планирование и подготовка исследования в заводских условиях, участие в проведении исследования и обсуждении результатов;

Павличенко А.В. – подготовка методической и аппаратурной части для проведения исследований, участие в проведении исследования и обработке экспериментальных результатов;

Томилин С.А. – участие в обсуждении результатов, представление экспериментальных результатов с использованием методологии контактной потенциометрии;

Жидков М.Е. – формулировка идеи и целей исследования, обсуждение результатов, утверждение плана проведения исследования в заводских условиях;

Гоок А.Э. – разработка модели градиента потенциалов, обработка экспериментальных данных с использованием модели и выявление закономерностей.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Surin V.I. – formulation of the idea and goals of the study, participation in planning and conducting research;

Ivany M.B. – metrological support of research results, development of a mathematical model;

Shcherbakov A.A. – primary processing of research results, identifying patterns, carrying out calculations and preparing a conclusion;

Shcherban A.S. – planning and preparation of research in factory conditions, participation in conducting research and discussing results;

Pavlichenko A.V. – preparation of methodological and instrumental parts for conducting research, participation in conducting research and processing experimental results;

Tomilin S.A. – participation in the discussion of the results, presentation of experimental results using the methodology of contact potentiometry;

Zhidkov M.E. – formulation of the idea and goals of the study, discussion of the results, approval of the plan for conducting the study in the factory;

Gook A.E. – development of a potential gradient model, processing of experimental data using the model and identifying patterns.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Виталий Иванович Сурин, кандидат технических наук, заведующий лабораторией функциональной электрофизической диагностики и неразрушающего контроля института ядерной физики и технологий (ИЯФТ), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0001-6153-0206>

e-mail: VISurin@mephi.ru

Михаил Борисович Иваний, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-9574-9165>

e-mail: MBIVanyi@mephi.ru

Александр Антонович Щербakov, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-1313-8829>

e-mail: AASherbakov@mephi.ru

Александр Сергеевич Щербань, начальник отдела методов неразрушающего контроля, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0009-0004-8619-4455>

e-mail: shcherban_as@atom mash.ru

Александр Викторович Павличенко, инженер по дефектоскопии I категории отдела неразрушающих методов контроля блока по качеству Волгодонского филиала АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: pavlichenko_avh@atom mash.ru;

Сергей Алексеевич Томилин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Максим Евгеньевич Жидков, директор филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: zhidkov_me@atom mash.ru

Андрей Эдуардович Гook, начальник центра профессиональных компетенций блока по управлению персоналом Волгодонского филиала АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: gook_ae@atom mash.ru

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

Mikhail B. Ivanyi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-9574-9165>

e-mail: MBIVanyi@mephi.ru

Alexander A. Shcherbakov, senior lecturer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-1313-8829>

e-mail: AASherbakov@mephi.ru

Alexander S. Shcherban, Head of Non-Destructive Testing Department, «Atom mash» the branch of JSC «AEM Technologies», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

<http://orcid.org/0009-0004-8619-4455>

e-mail: shcherban_as@atom mash.ru

Alexander V. Pavlichenko, category I flaw detection engineer of the department of non-destructive methods of unit quality control of the Volgogradsk branch of JSC Engineering Company AEM Technologies Atom mash, Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: pavlichenko_avh@atom mash.ru;

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Maxim E. Zhidkov, Head of the Atom mash branch of AEM-technologies JSC, Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: zhidkov_me@atom mash.ru

Andrey E. Gook, Head of the Professional Competence Center of the Personnel Management Unit of Atom mash branch of AEM-technologies JSC, Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: gook_ae@atom mash.ru

Поступила в редакцию / Received 13.09.2024

После доработки / Revised 10.12.2024

Принята к публикации / Accepted 12.12.2024