

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.039.53: 620.179.118 (075)

**ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ  
КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ**

© 2020 А.И. Алвахеба\*, В.И. Сурин\*, Т.Е. Иванова\*\*, О.В. Иванов\*\*,  
В.Г. Бекетов\*\*\*, В.А. Гошкодеров\*

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

\*\*ООО «Техноскан», Волгодонск, Россия

\*\*\*Волгодонский инженерно-технический институт Филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

Метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) использовали для обнаружения структурных неоднородностей в сварных соединениях и определения их координат. Для этого был подготовлен специальный образец, сваренный ручной дуговой сваркой из двух половин аустенитной стали 12Х18Н10Т размером 200×110×13,5 мм с рабочей шириной шва 12 мм. После сварки шов был просвечен на рентгеновской установке и получен снимок радиографического контроля. По результатам измерений построены поверхностные потенциограммы и проведена идентификация изображений структурных неоднородностей на потенциограммах с их изображениями на снимке радиографического контроля.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, метод СКП, сварные соединения в стали, радиографический контроль, дискретное преобразование сигналов.

Поступила в редакцию 28.11.2019

После доработки 30.03.2020

Принята к публикации 07.04.2020

## **Введение**

Все электрические методы диагностики и неразрушающего контроля можно условно разделить на контактные методы и бесконтактные. В настоящей статье представлены результаты применения контактного электрофизического метода – метода СКП для контроля структурных неоднородностей в сварном соединении [1, 2]. При этом применен новый физический подход, заключающийся в том, что поверхность раздела преобразователь-образец рассматривается как чувствительный элемент преобразователя. Данное представление позволяет, например, рассматривать возникновение диагностического сигнала на выходе преобразователя как результат влияния низкочастотных волн механических напряжений, излучаемых неоднородностями, находящимися в сварном соединении. В качестве первичных преобразователей используются измерительные контакты, изготавливаемые из различных металлов или сплавов. Различаются понятия электрического и механического контактов. Электрический контакт обеспечивает прохождение электрического тока через поверхность контакта. Если два металла соприкасаются, образуются две взаимодействующие поверхности, представляющие собой эффективные барьеры для электронов проводимости. Между атомами этих поверхностей возникают силы, приводящие к коррелированным изменениям их электронных оболочек, и зависящие от величины зазора между поверхностями. В зоне образующегося контакта возможно протекание следующих процессов [3-4]:

– хемосорбция на металлической поверхности или адсорбция газов, паров, вещества из растворов с образованием на поверхности металла химического соединения. Как известно, хемосорбция зависит от чистоты и химического состояния поверхности адсорбента, и возможна при наличии химической активности поверхности;

– металлическая и биметаллическая адгезия;

– когезивное взаимодействие металлов, в результате которого происходит сцепление молекул под действием сил притяжения ковалентной, ионной или металлической природы.

Перечисленные процессы могут существенно влиять на результат электрофизического контроля, однако, в настоящей работе они не играют заметной роли. Обычно перенос заряда через поверхность контакта различных металлов связывают с образованием разности электрических потенциалов (потенциалов Вольта), которая возникает между контактирующими телами в условиях термодинамического равновесия и принимается равной разности работ выхода металлов, отнесённой к заряду электрона.

При механическом контакте электрический ток через поверхность контакта может отсутствовать либо быть пренебрежимо малым, как например это происходит в случае контакта «проводник-изолятор», «изолятор-изолятор» и в ряде других случаев. Электрические свойства образующегося контакта зависят от качества обработки и чистоты поверхностей, особенностей электронной структуры металлов и ряда других факторов, что позволяет использовать электрический контакт в качестве чувствительного элемента, который преобразует внешнее механическое воздействие в электрические сигналы.

Взаимодействие электрофизического преобразователя с поверхностью описывается статистическими законами. Как известно, в зависимости от шероховатости поверхностей и приложенной нагрузки размер пятен реального контакта составляет от 0,1 до 10-40 мкм. На этих пятнах возникают давления, достигающие 10-20% от теоретической прочности материала. С увеличением нагрузки рост площади реального контакта происходит в основном за счет увеличения числа пятен при незначительном возрастании их размеров.

Площадь реального контакта составляет от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  номинальной площади касания  $S_0$  и даже при больших нагрузках не превышает 40%. Для пары металлов с различной твердостью площадь фактического контакта определяется свойствами более мягкого металла и геометрией поверхности твердого [5-7].

Современная теория механики контактов твердых тел справедлива при условии выполнения неравенства  $S \ll S_0$ , где  $S$  – площадь поверхности реального контакта. В основе большого числа работ по механике контактов твердых тел лежит приближение «грубой» поверхности со случайным распределением неровностей в виде сферических или эллиптических выступов, для которых справедлива контактная теория Герца. В некоторых случаях можно пренебречь упругим контактным взаимодействием неровностей в зоне контакта, если среднее расстояние между соседними контактирующими областями поверхностей достаточно велико.

### **Эксперимент. Подготовка образца контрольного сварного соединения и его радиографический контроль**

На предприятии ООО «Техноскан» в городе Волгодонске (Россия) подготовлен специальный образец – контрольное сварное соединение (КСС) и проведен радиографический контроль образца. Образец КСС сварен ручной дуговой сваркой из двух половин аустенитной стали 12X18H10T размером 200×110×13,5 мм (рис. 1). В соответствии с программой проведения исследования в процессе сварки сварщиком

были допущены нарушения правил сваривания изделий и введены в КСС различные структурные неоднородности (дефекты), приведенные в таблице 1. Типоразмер КСС имеет ширину шва равную 12 мм и вогнутость валика – от 40 до 55 мм.

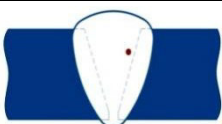


Рисунок 1 – Внешний вид образца КСС после сварки (слева). На фото справа показан образец после снятия усиления шва. Вверху на вставке выделен участок, на котором была измерена шероховатость поверхности  $R_a$ , с указанными численными значениями в мкм [Appearance of control sample after welding (left). The photo on the right shows the sample after removing the reinforcement of the seam. At the top of the inset, the area where the surface roughness  $R_a$  was measured with the indicated numerical values in  $\mu\text{m}$ ]

Таблица 1 – Характеристика дефектов КСС в соответствии с ГОСТ 7512-82 [Characteristics of control sample defects in accordance with 7512-82 All-Union State Standart]

| № п/п | Наименование дефекта         | Обозначение |        | Описание дефекта                                                                     | Рисунок |
|-------|------------------------------|-------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|       |                              | рус.        | англ.  |                                                                                      |         |
| 1     | Смещение кромок              | Скр45       | Fd45   | Недостаточно проваренный сварной шов. Выраженная линия почернения в зоне дефекта.    |         |
| 2     | Прерывистый непровар в корне | Нк12        | Da12   | Недостаточно проваренный сварной шов. Выраженная линия почернения в зоне дефекта.    |         |
| 3     | Прерывистый непровар в корне | Нк100       | Da100  |                                                                                      |         |
| 4     | Непровар по разделке шва     | Нр95        | Dc95   | Недостаточно проваренный сварной шов. Тонкая линия почернения, смещенная от оси шва. |         |
| 5     | Непровар по разделке шва     | Нр20        | Dc20   |                                                                                      |         |
| 6     | Непровар по разделке шва     | Нр45        | Dc45   |                                                                                      |         |
| 7     | Пора (две поры)              | 2П0,7       | 2Aa0,7 | Отдельное шарообразное включение газа. Темные круглые точки разного размера.         |         |
| 8     | Непровар по разделке шва     | Нр15        | Dc15   | Недостаточно проваренный сварной шов. Тонкая линия почернения, смещенная от оси шва. |         |

Продолжение таблицы 1

| № п/п | Наименование дефекта                 | Обозначение          |          | Описание дефекта                                                                              | Рисунок                                                                             |
|-------|--------------------------------------|----------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                      | рус.                 | англ.    |                                                                                               |                                                                                     |
| 9     | Пора                                 | П0,8                 | Aa0,8    | Отдельное шарообразное включение газа. Темные круглые точки разного размера.                  |  |
| 10    | Пора                                 | П0,3                 | Aa0,3    | Отдельное шарообразное включение газа. Темные круглые точки разного размера.                  |  |
| 11    | Скопление пор (длина скопления 2 мм) | C2П0,4               | Ac2Aa0,4 | Нерегулярно разбросанные шарообразные включения газа. Темные круглые точки разного размера.   |  |
| 12    | Свищ                                 | не стандарт изирован | —        | Трубчатое или воронкообразное углубление в шве. Темное пятно с неровными краями в центре шва. |  |
| 13    | Вольфрамовое включение               | В                    | Ca       | Светлое пятно произвольной формы.                                                             |  |

Радиографический контроль КСС выполнен на оборудовании РАПАН М 200/100, зав. № 103326 в соответствии с методикой по нормативу ПНАЭ Г-7-017-89. Оценка качества КСС проведена по ПНАЭ Г-7-010-89, тип пленки AGFA D7 (100×240), категория чувствительности – 0,2.

На снимке радиографического контроля (рис. 2) присутствуют изображения следующих дефектов:

- непровар корня (*Нк*);
- непровар по разделке (*Нр*);
- смещение кромок (*Скр*);
- скопление пор и отдельные поры (*Сп*, *П*);
- свищ;
- вольфрамовое включение (*В*).

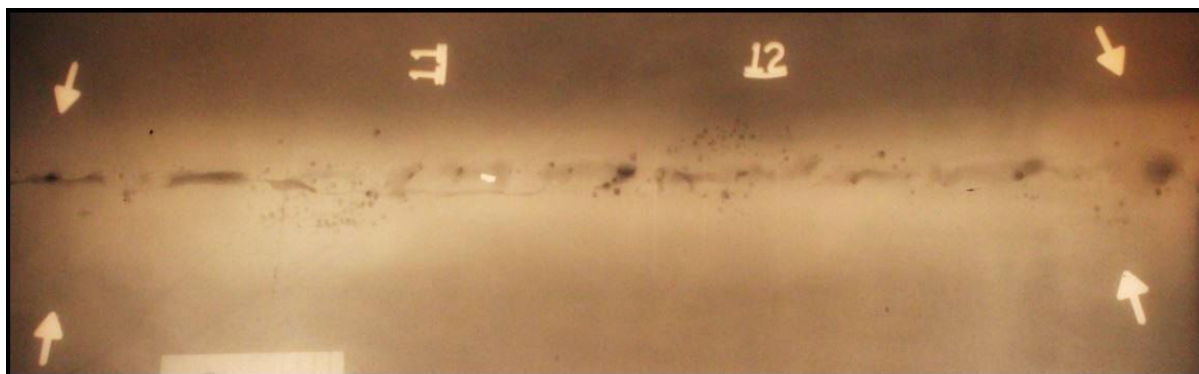


Рисунок 2 – Снимок радиографического контроля КСС [Control sample radiographic inspection]

По оси КСС расположены темные протяженные пятна, образованные на пленке от несплавленного корня шва. В некоторых местах они имеют более выраженные

очертания, в других – менее выраженные. Данный дефект обозначается буквами (*Нк*). Тонкая темная линия по краю шва показывает непровар по разделке шва. Начало координат располагается на снимке слева, указанное стрелками, и совпадает с началом координат на представленных потенциограммах.

Видны также большие скопления пор: внизу от знака «11» и в центральной части. Темное пятно относительно большого размера, практически, посередине шва – это изображение «свища». Данный дефект представляет собой незаполненную металлом трубчатую воздушную полость, полученную при сварке после всплытия газового пузыря к поверхности. Дефект направлен вглубь от поверхности КСС. В данном случае глубина его залегания составляет примерно 5 миллиметров. Правее от свища наблюдается скопление пор, объединенных в кластеры, а также имеются отдельные поры.

На снимке можно также видеть вольфрамовое включение в виде незначительно вытянутого вдоль оси шва светлого пятна, расположенного с левой стороны от дефекта «свищ». Глубина его залегания, определенная методом ультразвукового контроля, составляет около 10 мм.

### Методика выполнения электрофизического контроля (ЭФК)

Электрофизические измерения выполнены на программно-аппаратном комплексе «*ElphysLAB*-ИДС» мобильной информационно-диагностической системы, размещенной на ноутбуке Asus X554L. Методические основы технологии измерений подробно изложены в работе [8]. С целью повышения чувствительности обнаружения дефектов в КСС, непосредственно перед измерениями, шлифовкой было удалено усиление сварного соединения. После чего было выполнено ручное поточечное сканирование поверхности КСС по восьми продольным измерительным дорожкам (рис. 3).

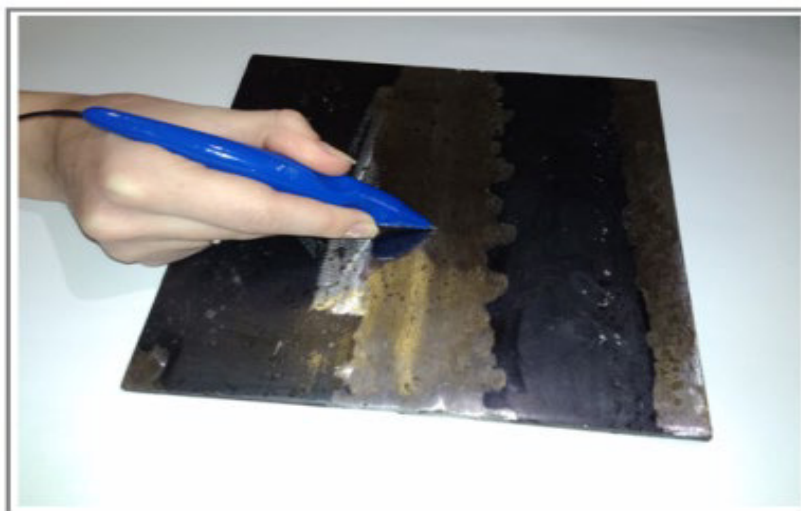


Рисунок 3 – Ручное поточечное сканирование поверхности сварного соединения по восьми измерительным дорожкам [Manual point-by-point scanning of the weld surface along eight measuring tracks]

Анализ потенциограмм проводили с помощью разработанного программируемого амплитудного дискриминатора (ПАД) измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 40 дБ. Назначение дискриминатора заключается в отсечке тех значений амплитуды сигнала, которые превышают контрольный уровень, что позволяет исследовать распределение электрического потенциала в разных масштабах. 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 комплекса «*ElphysLAB*-ИДС» управляется OS *Windows*, частота дискретизации измерений составляет 1 Гц.

При проведении ЭФК использовались конические преобразователи с углом конуса, близким к 90 градусов и радиусом скругления вершины, равным примерно 0,3 мм. Шероховатость поверхности ( $R_a$ ) чувствительного элемента, изготовленного из аустенитной стали X18H10T, была измерена профилометром, портативным цифровым, фирмы *Vogel*, и соответствовала значению 0,15 мкм.

Механическое ручное сканирование поверхности КСС было проведено с целью обнаружения введенных при сварке дефектов и определения их координат. Потенциограммы построены для различных структурных уровней диагностического сигнала ( $SLS$ ) ( $SLS = |\lg|\varphi||$ , где  $\varphi$  – функция диагностического сигнала). Точечное сканирование с шагом измерений около 2 мм проводилось последовательно по восьми дорожкам, расстояние между которыми составляло 1,5 мм. Средняя скоростью сканирования была равна, примерно, 2 мм/сек.

Погрешность определения координат дефектов при ручном сканировании составляет от одного до двух миллиметров. В случае использования автоматизированных приборов и установок данная погрешность может быть уменьшена до значения 0,1 мм и менее [9].

В таблице 2 приведено наименование используемого измерительного прибора и ПК, входящих в состав измерительного комплекса «*ElphysLAB-ИДС*».

Таблица 2 – Наименование измерительного прибора и ноутбука [Name of measuring device and laptop]

| № п/п | Наименование прибора | Тип        | Заводской номер    | Диапазон измерений | Основная предельная погрешность в указанном диапазоне |
|-------|----------------------|------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|
| 1     | Мультиметр Agilent   | настольный | MY 45040724 34401A | до 1 мВ            | 0,5 мкВ                                               |
| 2     | Ноутбук Asus X554L   | настольный | FBN0CV366137460    | –                  | –                                                     |

На рисунке 4 показана схема действия ПАД на амплитуду функции  $\varphi(t)$ , которая представлена аналитическими синусоидальными функциями. Симметричное во времени ограничение сигнала применяется в широком интервале амплитуд. Горизонтальными пунктирными линиями показаны значения  $SLS$  только для положительных полувольт выше нулевой отметки.

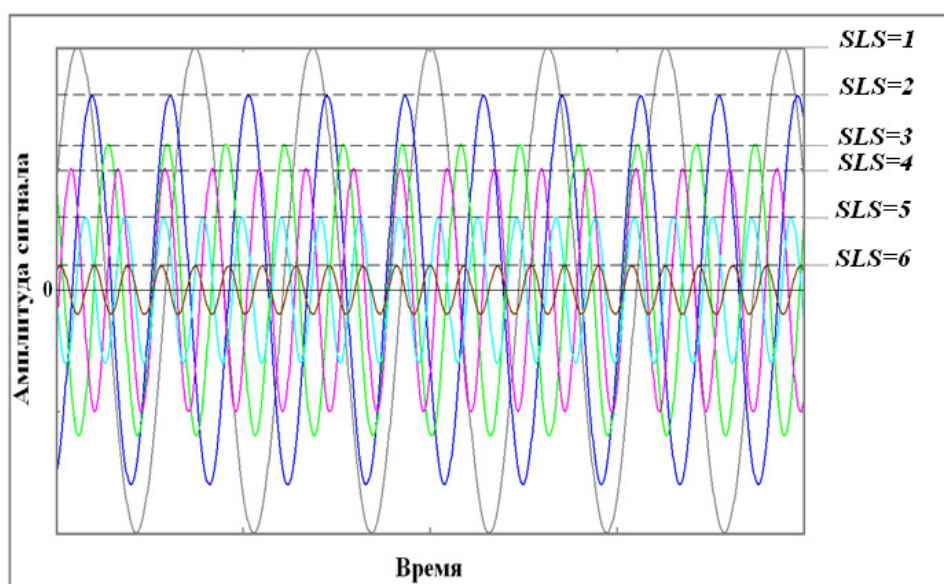


Рисунок 4 – Схема симметричного ограничения сигнала по амплитуде для разных значений  $SLS$  [The scheme of the symmetric limitation of the signal in amplitude for different  $SLS$  values]

Разработанная компьютерная программа для анализа потенциограмм позволяет масштабировать не только линейные размеры отдельных дефектов, но и все изображение, полученное для данного значения  $SLS$ . Эффект масштабирования изображений, наблюдаемых на потенциограммах, в данном случае, визуально похож на эффект увеличения разрешения оптического микроскопа при наблюдении через окуляр за поверхностью образца. Вид изображений на потенциограммах определяется заданной функцией экстраполяции и накладываемыми на нее граничными условиями. Программа фрагментирует участки поверхности по принципу равных значений амплитуды, ограничивает их замкнутым контуром и окрашивает эти участки в определенный цвет. Участки с максимальной амплитудой сигнала, для выбранного значения  $SLS$ , окрашиваются в красно-оранжевые тона, с минимальными положительными или отрицательными значениями – в сине-голубые тона.

### Методика дискретного преобразования сигнала с окном Хемминга

При использовании метода СКП одним из основных вопросов является вопрос об обнаружении мелких дефектов на фоне более крупных. Опыт использования оконного преобразования дает положительные результаты для динамически изменяющихся во времени процессов, например, таких, как ползучесть металлов или усталостная прочность [10, 11].

Рассмотрим функцию диагностического сигнала  $\varphi(t)$  конечной энергии на конечном временном интервале  $[t_1, t_2]$ . Тогда по определению интегральное преобразование Фурье от функции  $\varphi(t)$  имеет вид (1):

$$\Phi(\omega) = \int_{t_1}^{t_2} \varphi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Поскольку экспонента  $e^{-i\omega t}$  в (1) определена на всей вещественной оси, значения  $\Phi(\omega)$  будут зависеть от конкретных значений функции  $\varphi(t)$  в каждый момент времени. В данном представлении локализовать структурные неоднородности по частоте не представляется возможным. Для этого необходимо использовать оконное преобразование, которое раскладывает функцию на составляющие гармоники.

Результирующее преобразование Фурье с окном от функции  $\varphi(t)$  запишем в виде (2):

$$Q(u, v) = \int_{t_1}^{t_2} \varphi(t) q(t-u) e^{-ivt} dt. \quad (2)$$

Такое преобразование называется кратковременным преобразованием Фурье, поскольку умножение на функцию  $q(t-u)$  локализует интеграл в окрестности точки  $t=u$ .

Запись функции диагностического сигнала в виде дискретного ряда Фурье является частным случаем интегрального преобразования Фурье. Если функцию  $\varphi(t)$  представить в виде (3) [12]:

$$\varphi(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f[n] \delta(t-n), \quad (3)$$

где  $\delta(t-n)$  – дельта функция Дирака, тогда

$$\Phi(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \varphi[n] e^{-i\omega n}.$$

Для любого  $n \in \mathbf{Z}$ , где  $\mathbf{Z}$  – множество целых чисел, экспонента  $e^{-i\omega n}$  имеет период, равный  $2\pi$ , поэтому и ряд Фурье имеет также период, равный  $2\pi$ . Все функции, удовлетворяющие условию

$$\int |\varphi(t)|^2 dt < +\infty$$

и принадлежащие пространству функций с конечной энергией  $L^2$ , могут быть записаны в виде ряда Фурье. По определению дискретное преобразование Фурье (ДПФ) функции  $\varphi$  есть:

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

Обратное дискретное преобразование Фурье имеет вид (4):

$$\varphi[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Phi[k] \exp\left(\frac{i2\pi kn}{N}\right). \quad (4)$$

Дискретное преобразование Фурье функции  $\varphi$  с периодом  $N$  вычисляется по ее значениям в интервале  $0 \leq n < N$ . Важно также отметить, что функция диагностического сигнала должна удовлетворять условию периодичности с периодом  $N$ , а не быть просто функцией конечного сигнала по  $N$  отсчетам. Дискретная сумма Фурье (4) определяет сигнал с периодом  $N$ , у которого значения на концах интервала  $\varphi[0]$  и  $\varphi[N-1]$  должны быть если не равными, то, по крайней мере, близкими. Если значения  $\varphi[0]$  и  $\varphi[N-1]$  сильно отличаются друг от друга, то это приводит к резкому скачку всей суммы Фурье, а также появляются высокочастотные составляющие с относительно большими амплитудами.

Дискретное преобразование Фурье с окном  $g[n]$  для периодической функции  $\varphi[n]$  с периодом  $N$  определяется выражением (5):

$$Q[m, l] = \sum_{n=0}^{N-1} \varphi[n] g[n-m] \exp\left(\frac{-i2\pi ln}{N}\right) \quad (5)$$

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

В качестве функции окна  $g(t)$  выбрана функция Хемминга с периодом, равным  $T$  (6):

$$g(t) = 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (6)$$

которая, согласно работе [12] в интервале изменения  $[-1/2, 1/2]$  имеет среднеквадратическую ширину диапазона, равную 0,5. Максимальная амплитуда первых боковых максимумов этой функции равна  $-43$  дБ, ширина диапазона  $\Delta\omega = 1,36$  и степень асимптотического убывания на больших частотах равна нулю. Окно  $g[n]$  представляет собой симметричный дискретный сигнал с периодом  $N$  и единичной нормой  $\|g\| = 1$ , где по определению нормы:

$$\|g\| = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} |g(t)|^2 dt \right)^{1/2}.$$

Для дискретного преобразования Фурье функция окна Хемминга принимает вид (7):

$$g[n] = 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right). \quad (7)$$

График данной функции для  $N = 100$  показан на рисунке 5.

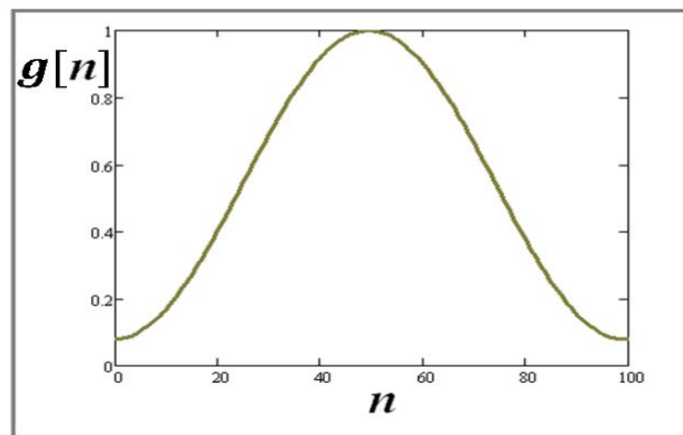


Рисунок 5 – График окна Хемминга, используемого для ЭФК КСС [The graph of the Hamming window used for the electrophysical testing of control sample]

Каждый дефект структуры обладает своей излучающей способностью волн механических напряжений. Более интенсивное излучение дефекта на потенциограмме дает изображение, которое соответствует более высокой амплитуде сигнала. Для интерпретации полученных результатов мы применяем физическую модель, согласно которой каждому дефекту, находящемуся в сварном соединении, поставлен в соответствие некий гармонический осциллятор, амплитуда которого описывается функцией  $C(t)$  (8):

$$C(t) = A_0 + \sum_{m=1}^M \left( A_m \cos\left(\frac{m\pi t}{N}\right) + B_m \sin\left(\frac{m\pi t}{N}\right) \right), \quad (8)$$

где  $A_0$  – постоянная, характеризует усредненное значение внутренних напряжений в зоне расположения дефекта;  $A_n$  и  $B_n$  – коэффициенты гармоник. Упругие волны механических напряжений от дефекта, доходящие до поверхности биметаллического контакта, изменяют равновесное распределение электронов проводимости в этой области, что мгновенно отражается на знаке и амплитуде регистрируемого сигнала. Волны необратимой поверхностной деформации приводят к изменению числа пятен контакта и их площади, что также влияет на вид функции  $\varphi(t)$  [13].

### Результаты

На рисунке 6 представлена поверхностная потенциограмма КСС для низкого уровня  $SLS=1,824$  с максимальной амплитудой  $\varphi = 0,015$  В. По оси  $x$  обозначена координата вдоль измерительных дорожек. Максимальное значение  $x$  соответствует значению длины сварного соединения. По оси  $y$  показан номер измерительной дорожки. В верхней части рисунка приведен фрагмент снимка радиографического

контроля КСС (см. рис. 2). На данном структурном уровне видны изображения самых мощных по амплитуде структурных неоднородностей. В частности, хорошо видно смещение кромок КСС (обозначение по ГОСТ 7512-82 «Скр») – широкие полосы светло-зеленого цвета. На потенциограмме можно видеть также два локальных непровара по разделке ( $H_p$ - $H_p$ , слева внизу) и дефект, расположенный на центральной измерительной дорожке ( $H_k$ ). В нижнем правом углу рисунка располагаются два изображения: поры ( $\Pi$ ) и непровара по разделке шва ( $H_p$ ). Цифры, показанные около дефектов, характеризуют градиент изменения потенциала и соответствуют определенному цвету изображения.

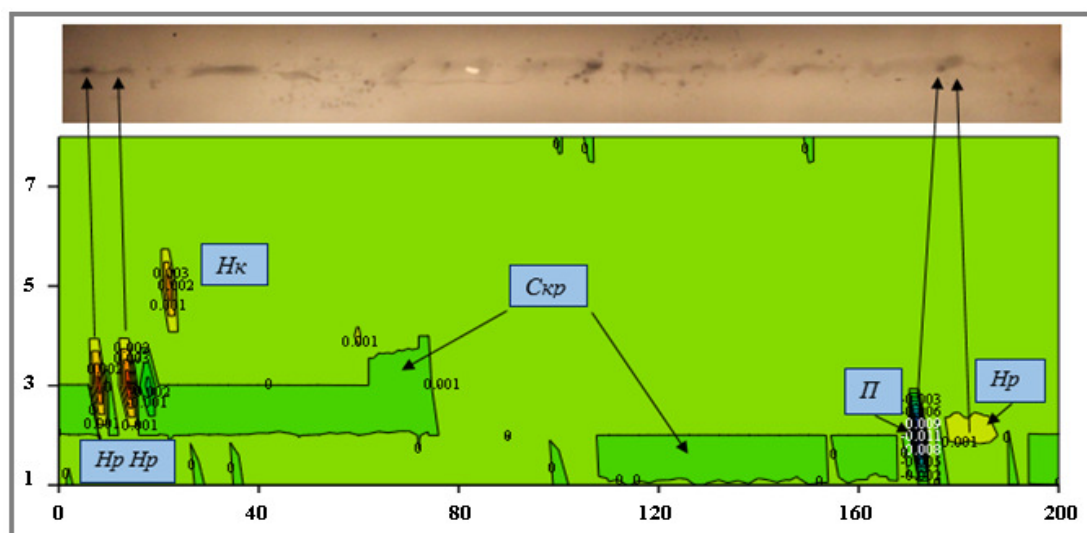


Рисунок 6 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS = 1,824$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 1,824$ ]

На более высоком структурном уровне  $SLS = 2,42$  (рис. 7) видны протяженные широкие полосы светло-коричневого цвета (вдоль дорожек 3 и 4) в виде ступеньки, идентифицируемые как непровар по разделке КСС ( $H_p$ ).

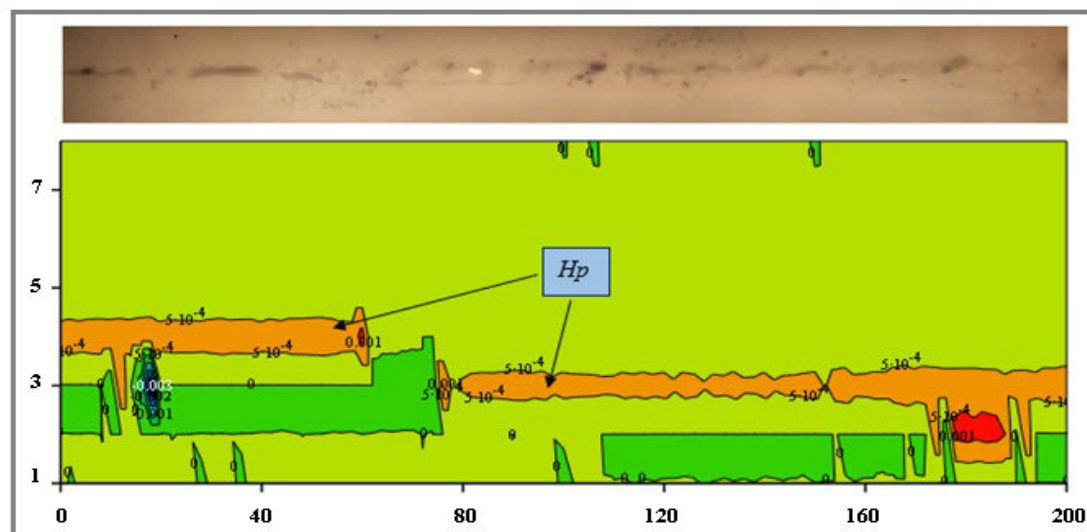


Рисунок 7 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS = 2,42$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 2,42$ ]

Тонкая структура непровара по разделке ( $H_p$ ) видна на более высоком уровне  $SLS = 2,959$  (рис. 8): относительно узкий по ширине гребень непровара, желто-оранжевого цвета, имеет значение  $\varphi = 600$  мкВ. Можно предложить описание данного дефекта в объеме: плавные ниспадающие склоны расположены симметрично с обеих его сторон (вставка в правом верхнем углу потенциограммы). Значения функции уменьшаются на склонах и достигают наименьшего значения, равного  $\varphi = 100$  мкВ.

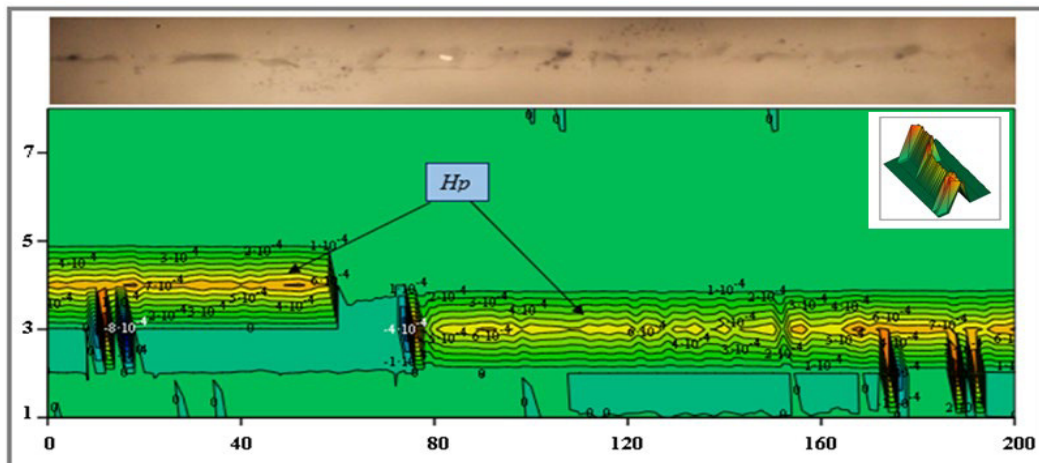


Рисунок 8 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS = 2,959$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 2,959$ ]

Переход на последующий уровень со значением  $SLS=4,155$  позволяет получить более высокое разрешение измерительной системы. На потенциограмме появляются дефекты, связанные с непроваром корня ( $H_k$ ). Прерывистый характер данного дефекта хорошо заметен вблизи центральной измерительной дорожки (номер 5). На данном рисунке можно также видеть изображение того места, где на снимке находится вольфрамовое включение ( $B$ ) и некоторые другие дефекты. Изображения дефектов ( $H_k$ ) и ( $B$ ) имеют один и тот же цвет – желтый. Это означает, что в данном случае, они все располагаются в одной плоскости, которую условно можно назвать «плоскостью сечения», с соответствующим значением  $SLS$ . Дефект же ( $Скр$ ) имеет «внутреннее углубление», что особенно хорошо заметно на рисунках 9 и 10.

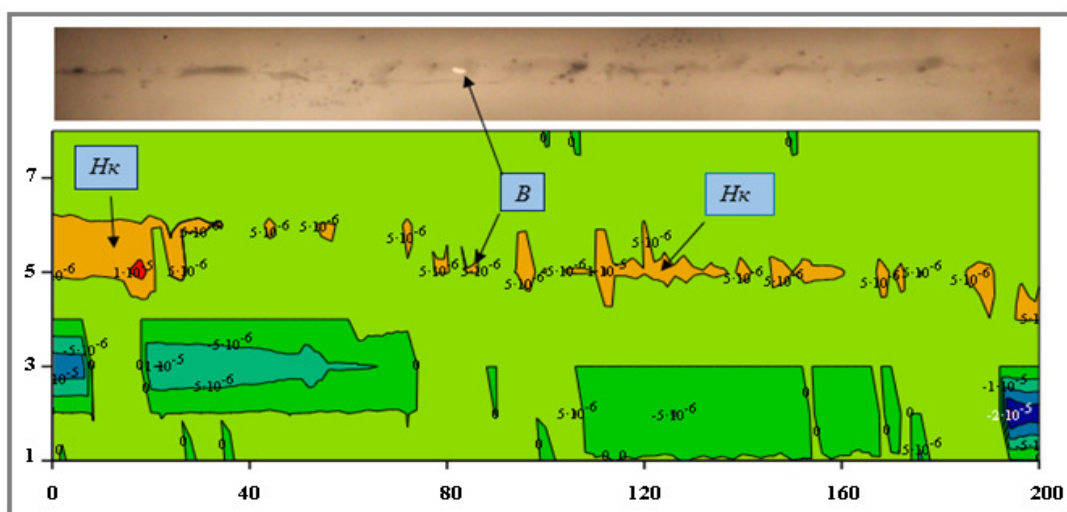


Рисунок 9 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS=4,155$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS=4,155$ ]

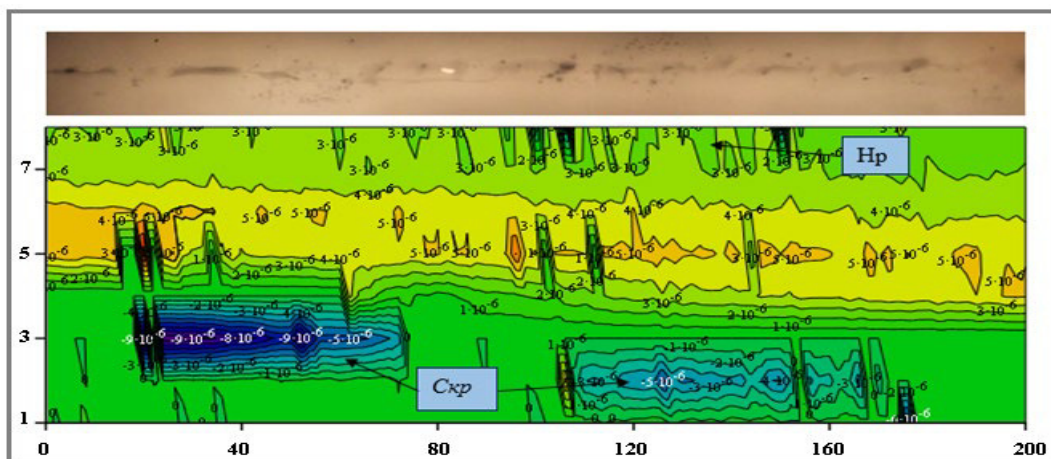


Рисунок 10 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS = 5$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 5$ ]

При сваривании глубоких швов приходится использовать послойное сваривание. Первый слой наплавляют высотой 3-5 мм, ширина которого 3-4 мм. Последующие слои выполняет электродами большего диаметра 4-5 мм. Перед наплавкой очередного слоя поверхность разделки шва зачищается металлической щеткой от шлака и брызг металла. При этом, если специально не прогревать свариваемое соединение, то последующий слой металла ложится на остывающий слой. В результате чего возникают локальные градиенты температуры, которые могут приводить к образованию пустот или микротрещин.

Рисунок 11 дает изображения многочисленных источников механических напряжений на уровне  $SLS = 5$  и их объемное представление. Сравнивая эти изображения с изображениями на снимке радиографического контроля можно понять к каким именно дефектам относятся эти изображения и определить их координаты. Обратим внимание на то, что на данном структурном уровне в нижней части потенциограммы, по-прежнему, присутствует неоднородность (Скр), что говорит о широком по амплитуде диапазоне излучения данной неоднородности. В верхней части рисунка 10 в виде отдельных фрагментов зеленых оттенков виден непровар по разделке (Нр).

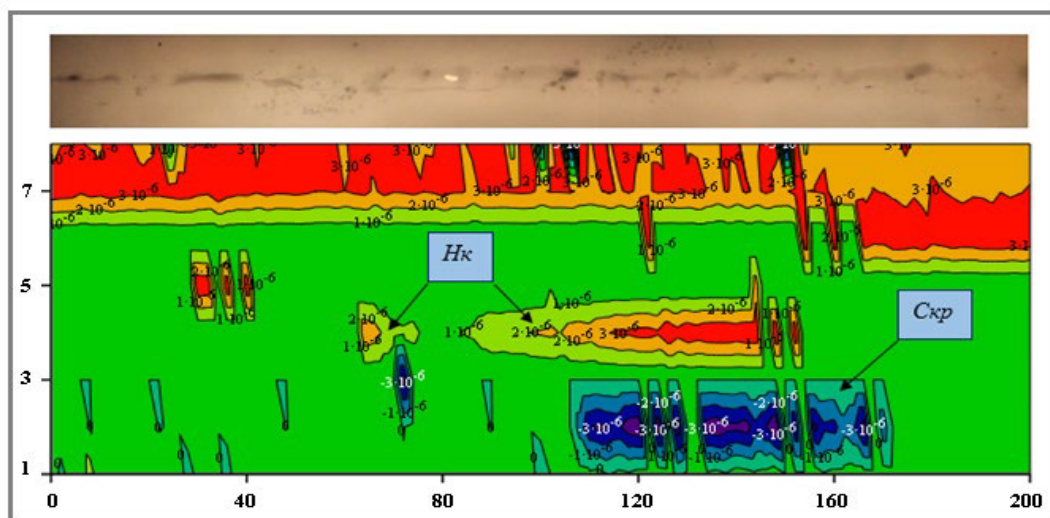


Рисунок 11 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциограмме для  $SLS = 5,398$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 5,398$ ]

На рисунке 12 хорошо видна тонкая структура непровара корня ( $H_k$ ) вдоль центральной измерительной дорожки и тонкая структура смещения кромок для  $SLS = 5,398$ . В частности, можно видеть, что глубина дефекта  $Скр$  неравномерна по его длине, а сам дефект состоит из отдельных фрагментов, которые образовались в процессе сварки. Следует также отметить и широкую линию непровара по разделке верхней части КСС. Сравнивая данный рисунок с предыдущим, можно заключить, что на нем нет дефекта ( $B$ ) вследствие отсутствия волн напряжений в рассматриваемом интервале амплитуд. Локализация дефекта «свищ» и поле внутренних напряжений около вольфрамового включения ( $B$ ) при  $SLS = 5,699$  показана на рисунке 12. Дефект ( $Скр$ ) фрагментирован на данном рисунке на отдельные цветные пятна сине-голубых оттенков и многочисленные остроконечные треугольники небольшого размера. Треугольники распределены вдоль второй измерительной дорожки, с координатами: начало  $x \approx 10$ , конец  $x \approx 90$ .

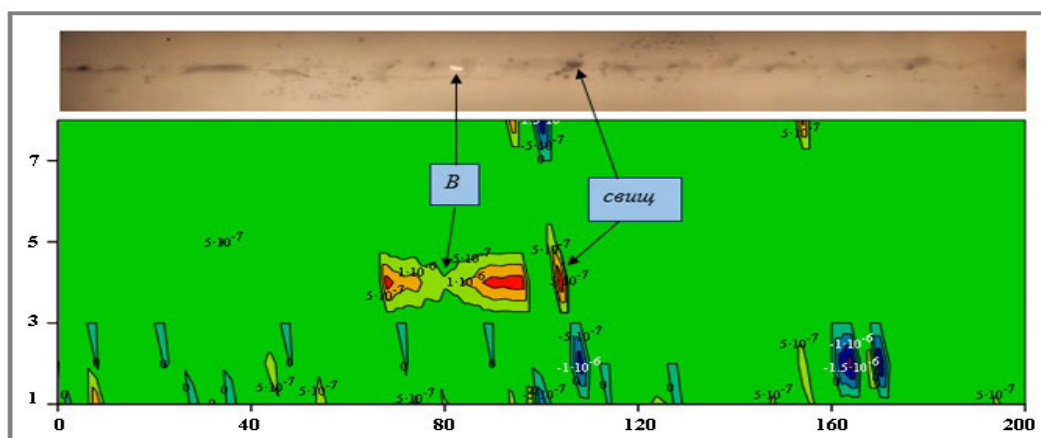


Рисунок 12 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциграмме для  $SLS = 5,699$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 5,699$ ]

На рисунке 13 приведена потенциграмма с высоким амплитудным разрешением для  $SLS = 6$ , на которой локализованы дефекты «свищ», непровар корня ( $H_k$ ), пора ( $\Pi$ ), вольфрамовое включение ( $B$ ) и смещение кромок ( $Скр$ ) по всей длине КСС. Видны также координаты этих дефектов. Как будет показано ниже дефект пора ( $\Pi$ ) и вольфрамовое включение ( $B$ ) окажутся не одиночными, а спаренными дефектами.

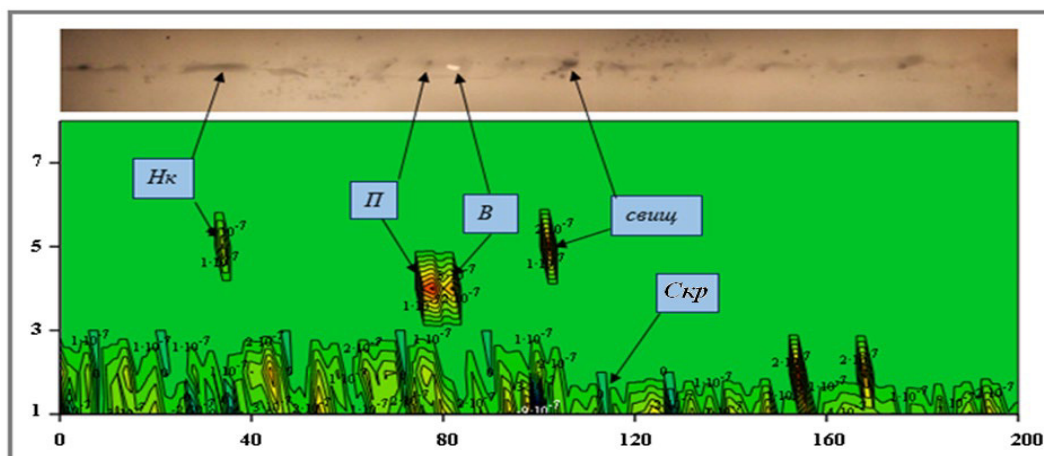


Рисунок 13 – Изображения структурных неоднородностей и их координаты на поверхностной потенциграмме для  $SLS = 6$  [Images of structural heterogeneities and their coordinates on the surface potentiogram for  $SLS = 6$ ]

Из представленных рисунков можно заключить, что дефект (*Скр*) дает излучение волн механических напряжений в широком диапазоне амплитуд. На этом фоне возникает проблема обнаружения более мелких по размерам дефектов. Кроме этого излучение от мелких дефектов, расположенных глубоко в КСС, ослабляется за счет затухания механических волн в объеме материала. Определенные трудности возникают при обнаружении двух небольших по размерам дефектов, находящийся один под другим.

Вопрос о физическом механизме образования волн напряжений от дефектов в сварном соединении, а также, каким образом волны механических напряжений влияют на величину и знак регистрируемого сигнала, пока остается открытым. Так при анализе поверхностных потенциограмм стального бруса с просверленными глухими отверстиями разной глубины, было замечено, что изображения внутренних кромок отверстий происходят от волн напряжений, излучаемых внутренней поверхностью отверстия, образованного при сверлении кромок режущего инструмента.

### Выявление дефектов с помощью дискретного преобразования Фурье

Совместное использование узкополосного фильтра ПАД с высоким разрешением по амплитуде сигнала и формализма ДПФ с частотно-временными окнами позволяет эффективно идентифицировать дефекты КСС, в том числе и образующиеся спаренные дефекты.

На рисунках 14 и 15 показаны примеры частотной локализации дефектов в КСС. В нижней части рисунка 14 приводится вид локализованного дефекта на линейной потенциограмме (розовый цвет) и его гармоника в представлении ДПФ (косинусоида синего цвета). Шкала по оси  $y$  относится к обеим кривым одновременно. Дефект был идентифицирован как локальный непровар корня на уровне  $SLS = 1,824$  (см. рис. 6), расположенный на пятой измерительной дорожке. На рисунке 15 показан результат обнаружения на третьей дорожке непровара корня и дефекта (*Скр*) на пятой дорожке на уровне  $SLS = 4,155$  (см. рис. 9), а также соответствующие этим дефектам спектры Фурье.

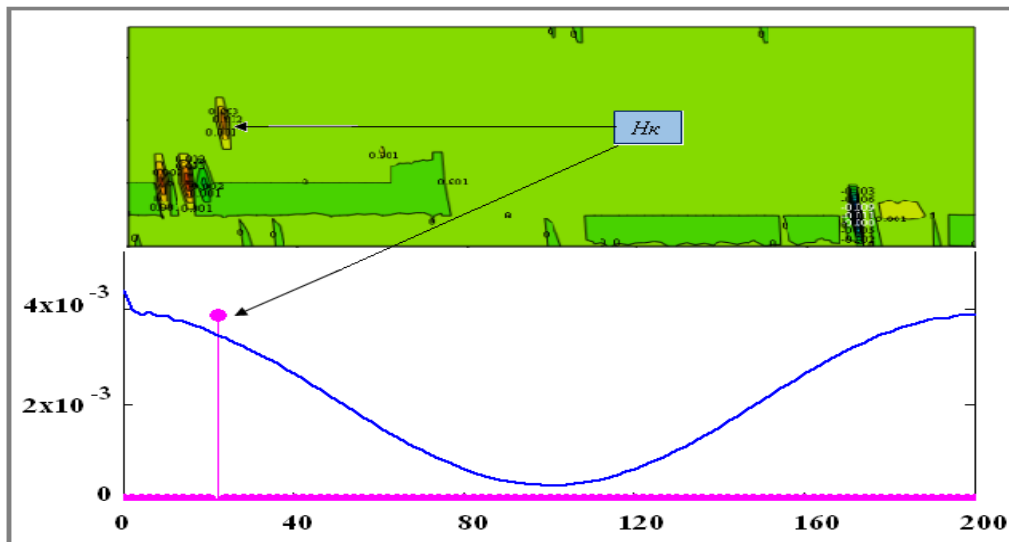


Рисунок 14 – Частотная локализация структурных неоднородностей. Одиночный дефект непровара корня (*Hk*) локализован на линейной потенциограмме в верхней части рисунка. В нижней части рисунка данный дефект выделен розовым цветом. Гармоника, тригонометрическая функция косинуса, соответствующая данному дефекту в представлении ДПФ, показана в нижней части рисунка синим цветом [Frequency localization of structural heterogeneities. A single root deficiency defect (*Hk*) is localized on a linear potentiogram in the upper part of the figure. At the bottom of the figure, this defect is highlighted in pink. Harmonics, the trigonometric cosine function corresponding to a given defect in the DFT representation is shown in blue at the bottom of the figure]

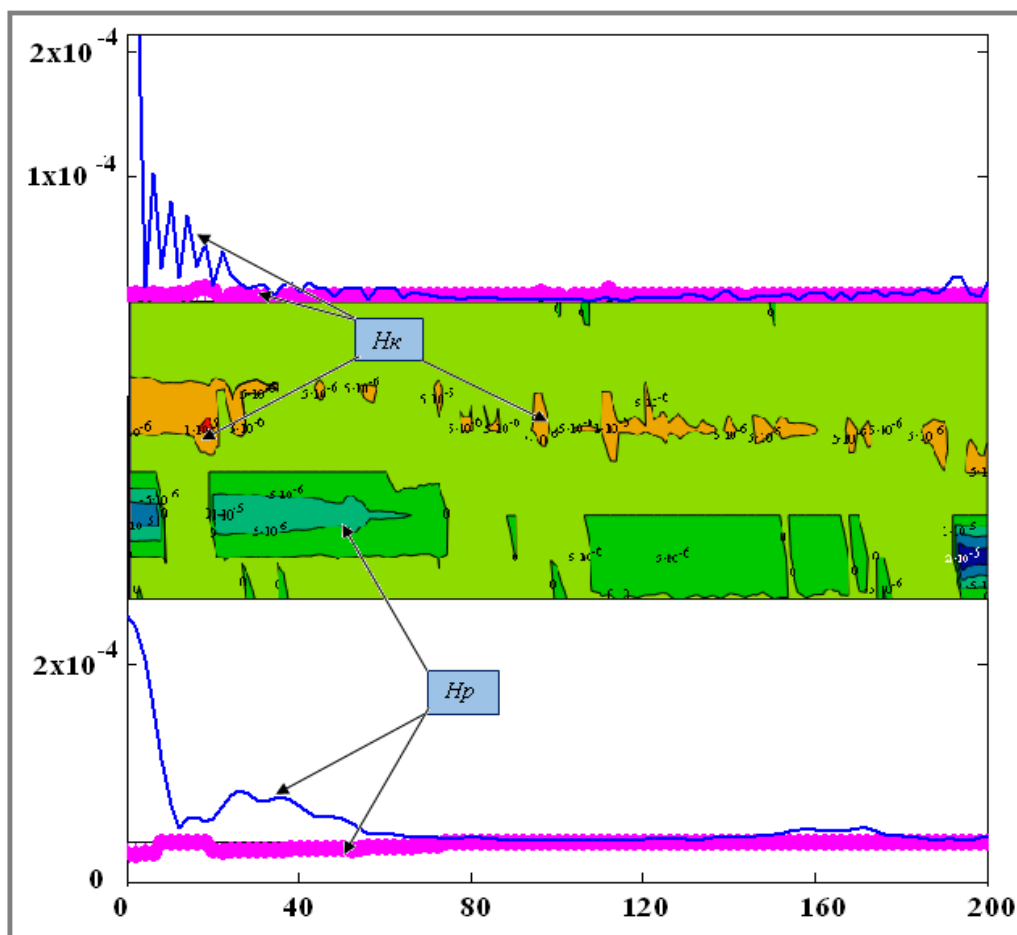


Рисунок 15 – Частотная локализация структурных неоднородностей. В центре рисунка показана поверхностная потенциограмма. Вверху от нее приведена линейная потенциограмма и спектр Фурье с окном Хемминга для дефекта непровар корня ( $H_k$ ), а в нижней части рисунка приведена линейная потенциограмма и спектр Фурье с окном Хемминга для дефекта непровар по разделке ( $H_p$ ) [Frequency localization of structural heterogeneities. In the center of the figure, a surface potentiogram is shown. At the top of it is a linear potentiogram and Fourier spectrum with a Hamming window for a root penetration defect ( $H_k$ ), and at the bottom of the figure, a linear potentiogram and a Fourier spectrum with a Hamming window for a root penetration defect ( $H_p$ ) are shown]

На рисунке 16 показан пример обнаружения двух спаренных дефектов (двойников), образованных на 4-той измерительной дорожке, первоначально идентифицируемых как пора ( $\Pi$ ) и вольфрамовое включение ( $B$ , см. рис. 13). На потенциограммах в нижней части видна также детализация дефектов  $Скр$ . Первоначально, следуя рисунку 16 а при  $SLS = 6$ , был сделан ошибочный вывод о том, что на линейной потенциограмме (рис. 16 а, слева) присутствуют изображения четырех отдельных дефектов на 4-той и 5-той дорожках. В соответствии с принятой моделью (формула 8) ДПФ дает локализацию четырех гармоник, образующихся от четырех одновременно действующих источников. Однако, при более внимательном рассмотрении графиков можно убедиться, что только два дефекта располагаются на 4-той измерительной дорожке, а два других – на соседней пятой дорожке. При последовательном увеличении значения  $SLS$  от 6 до 6,26 были получены изображения, на которых двойники, расположенные на 4-той дорожке, начинают распадаться на одиночные дефекты и затем исчезают при  $SLS = 6,26$  (рис. 16 д). В результате фильтрации на потенциограмме остается только один дефект на 5-той дорожке, идентифицируемый как локальный непровар корня ( $H_k$ ). Изображение этого дефекта исчезает с потенциограммы при  $SLS = 6,31$ .

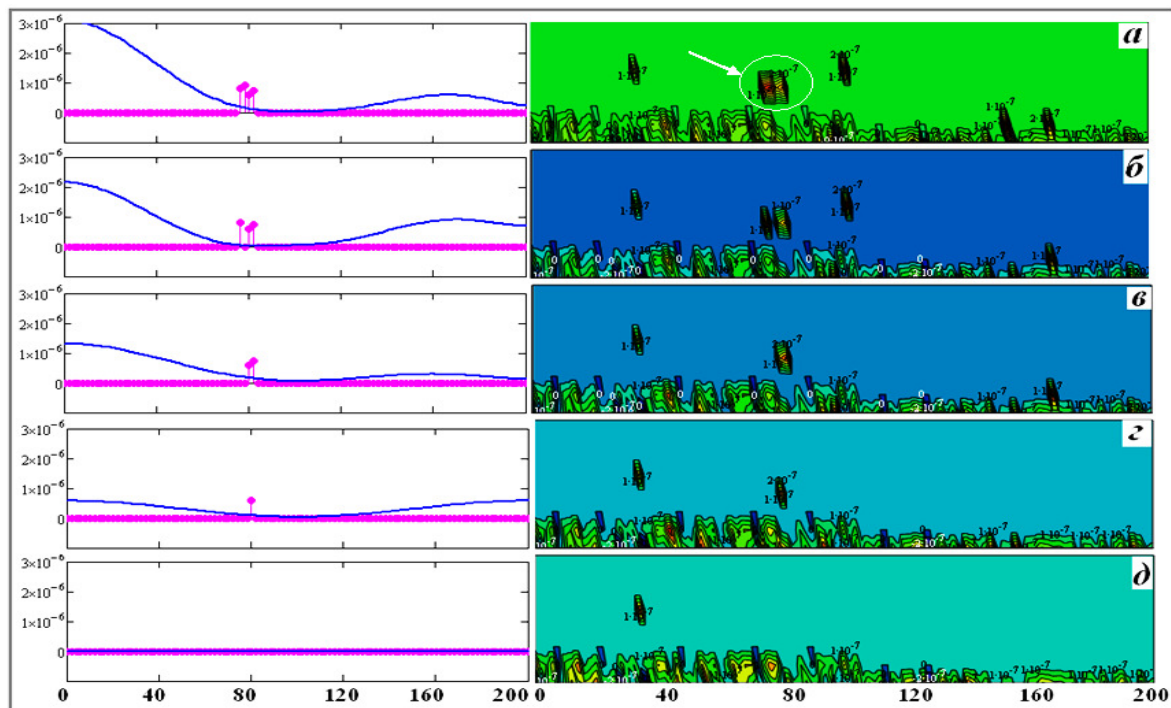


Рисунок 16 – Изображения спаренных двойников в КСС. Двойники выделены на рисунке, а в белый круг и показаны стрелкой. С левой стороны рисунков приведены линейные потенциограммы (розового цвета) и кривые ДПФ с окном Хемминга (синего цвета). Изображения получены для высоких значений  $SLS$ : а – 6; б – 6,046; в – 6,097; г – 6,155; д – 6,26 [Images of twin counterparts in control sample. Doubles are highlighted in figure a in a white circle and are shown by an arrow. On the left side of the figures are linear potentiograms (pink) and DFT curves with a Hamming window (blue). Images were obtained for high  $SLS$  values: а – 6; б – 6,046; в – 6,097; г – 6,155; д – 6,26]

Таким образом, используя метод последовательной фильтрации на основе узкополосного фильтра ПАД с шагом 0,1 мкВ, можно определить спаренные дефекты (двойные, тройные и т.д.), которые располагаются в непосредственной близости друг от друга в горизонтальной, либо в вертикальной плоскости (друг под другом).

### Вывод

Метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) использовали для обнаружения структурных неоднородностей в сварном соединении и определения их координат. Для этого был подготовлен специальный образец, сваренный ручной дуговой сваркой из двух половин аустенитной стали 12X18Н10Т размером  $200 \times 110 \times 13,5$  мм с рабочей шириной шва 12 мм. После сварки шов был просвечен на рентгеновской установке и получен снимок радиографического контроля. По результатам измерений построены поверхностные потенциограммы и проведена идентификация изображений дефектов на потенциограммах с их изображениями на снимке радиографического контроля. Идентификация изображений на потенциограммах дает удовлетворительное соответствие с изображениями этих же дефектов на снимке радиографического контроля. Полученные результаты объясняются на основе ранее опубликованных расчетных и физических моделей.

В частности, дефект смещения кромок дает излучение волн механических напряжений в широком диапазоне амплитуд. На этом фоне возникает проблема обнаружения более мелких по размерам дефектов. Кроме этого излучение от мелких дефектов, расположенных глубоко в КСС, ослабляется за счет затухания механических волн в объеме материала. Определенные трудности возникают при обнаружении двух небольших по размерам дефектов, находящихся рядом или один под другим.

Совместное использование узкополосного фильтра ПАД с высоким разрешением по амплитуде сигнала и математического формализма ДПФ с частотно-временными окнами позволяет эффективно идентифицировать дефекты различного типа, в том числе и образующиеся спаренные дефекты.

#### Благодарность

Авторы благодарят сварщика ООО «Техноскан» Колыхалова Ю. А. за подготовку образца сварного соединения для проведения исследования.

Работа поддержана грантом РФФИ по договору №19-08-00266/19 от 10.01.2019.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сурин, В. И.* Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования / В. И. Сурин, З. С. Волкова, Р. А. Денисов, В. Д. Мотовилин, Н. В. Рейн // Глобальная ядерная безопасность. – № 4(21). – 2016. – С. 51-62.
2. *Surin, V. I.* New potential for potentiometry. *Nuclear Engineering International*. 63 (765). 2018. P. 30-32.
3. *Ferrante J., Smith J.R.* Theory of metallic adhesion. *Physical Review*. B.V.19. 1979. P.3911-3920.
4. *Rose J.H., Ferrante J., Smith J.R.* Universal binding energy curves for metals and bimetallic interfaces. *Physical Review Letters*. V.47. 1981. P.675-678.
5. *Тейбор, Д.* Проблемы трения и смазки / Д. Тейбор. – 1981. – Т.103. – №2. – С. 1-19.
6. *Дроздов, Ю. Н.* Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Арчegov, В. И. Смирнов. – Москва : Наука, 1981. – 139 с.
7. *Баранов, В.М.,* Акустическая эмиссия при трении / В. М. Баранов, Е. М. Кудрявцев, Г. А. Сарычев, В. М. Щавелин. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 256 с.
8. *Сурин В. И.* Электрофизические методы неразрушающего контроля и исследования реакторных материалов / В. И. Сурин, Н. А. Евстюхин. – Москва : МИФИ, 2008. – 167 с.
9. *Сурин В. И.* Разработка средств и методов обработки сигналов электрофизической диагностики для физико-механических испытаний материалов / В. И. Сурин, А. А. Абу Газал, Е. В. Волошин, Е. Ю. Тельнов, Д. О. Титовец // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2017. – № 4(166). – С. 55-59.
10. *Сурин, В. И.* Частотно-временное представление результатов электрофизического неразрушающего контроля / В. И. Сурин, И. А. Ерофеев, И. С. Крюков, В. И. Савин // VII Международная научная школа-конференция (Современные проблемы физики и технологии) – Москва : НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 207-208.
11. *Сурин, В. И.* Поверхностная потенциометрия металлических материалов при длительных усталостных испытаниях / В. И. Сурин, Т. Н. Зорина, А. Ф. Коротин // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Том 2. Нанотехнологии и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2010. – 344 с.
12. *Mallat, S.* A wavelet tour of signal processing. Second Edition. Academic Press, 1999.
13. *Persson, B.N.J.* Contact mechanics for randomly rough surfaces. *Surface Science Reports*. 2006. V.61. P. 201-227.

#### REFERENCES

- [1] Surin V.I., Volkova Z.S., Denisov R.A., Motovilin V.D., Rein N.V. Metody` e`lektrofizicheskoy diagnostiki i kontrolya reaktornogo oborudovaniya [Methods of Electrophysical Diagnostics and Control of Reactor Equipment]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*[Global Nuclear Security]. № 4(21). P. 51-62 (in Russian).
- [2] Surin V.I. New Potential for Potentiometry. *Nuclear Engineering International*. 63 (765). 2018. P. 30-32.
- [3] Ferrante J., Smith J.R. Theory of Metallic Adhesion. *Physical Review*. B.V.19. 1979. P.3911-3920.
- [4] Rose J.H., Ferrante J., Smith J.R. Universal Binding Energy Curves for Metals and Bimetallic Interfaces. *Physical Review Letters*. V.47. 1981. P.675-678.
- [5] Tabor D. Problemy` treniya i smazki [Problems of Friction and Lubrication]. 1981. T.103. №2. C. 1-19 (in Russian).
- [6] Drozdov Y.N., Archegov V.G., Smirnov V.I. Protivozadirnaya stojkost` trushhixsya tel [Extreme Pressure Resistance of Rubbing Bodies]. Moskva: Nauka [Moscow: The Science]. 1981. 139 p. (in Russian).

- [7] Baranov V.M., Kudryavtsev E.M., Sarychev G.A., Shovelin V.M. Akusticheskaya e'missiya pri trenii [Acoustic Emission in Friction]. Moskva: E'nergoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1998. 256 p. (in Russian).
- [8] Surin V.I., Evstyukhin N.A. E'lektrofizicheskie metody` nerazrushayushhego kontrolya i issledovaniya reaktorny`x materialov [Electro-physical Methods of Nondestructive Testing and Research of Reactor Materials]. Moskva: MIFI [Moscow: MEFPhI]. 2008. 167 p. (in Russian).
- [9] Surin V.I., Abu ghazal A.A., Voloshin E.V., Telnov E.Yu., Titovets D.O. Razrabotka sredstv i metodov obrabotki signalov e'lektrofizicheskoy diagnostiki dlya fiziko-mexanicheskix ispy'tanij materialov [Development of Means and Methods of Processing of Electrophysical Diagnostics Signals for Physical and Mechanical Tests of Materials]. Informacionny'e tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve [Information technologies in design and production]. Moskva: FGUP VIMI [Moscow: FSUE VIMI]. 2017. №4 (166). P.55-59 (in Russian).
- [10] Surin V.I., Erofeev A.I., Kryukov I.S., Savin, V.I. Chastotno-vremennoe predstavlenie rezul'tatov e'lektrofizicheskogo nerazrushayushhego kontrolya [Time-Frequency Representation of the Results of Non-Destructive Control of Electrophysical] VII Mezhdunarodnaya nauchnaya shkola-konferenciya (Sovremennyye problemy` fiziki i tekhnologii) [VII International Scientific School-Conference (Modern Problems of Physics and Technology)]. Moskva: MIFI [Moscow: MEFPhI]. 2018. P.207-208 (in Russian).
- [11] Surin V.I., Zorina T.N., Korotin A.F. Poverxnostnaya potentsiometriya metallicheskih materialov pri dlitel'ny`x ustalostny`x ispy'taniyax [Surface Potentiometry of Metal Materials during Long-Term Fatigue Tests]. Nauchnaya sessiya NIYaU MIFI-2010. Tom 2. Nanofizika i nanotekhnologii. Fundamental'ny'e problemy` nauki [Scientific Session of MEFPhI-2010. Volume 2. Nanophysics and Nanotechnologies. Fundamental Problems of Science]. Moskva: MIFI [Moscow: MEFPhI]. 2010. 344 p. (in Russian).
- [12] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. Second Edition. Academic Press. 1999.
- [13] Persson B.N.J. Contact Mechanics for Randomly Rough Surfaces. Surface Science Reports. 2006. V.61. P. 201-227.

### Detection of Welded Joint Defects by Scanning Contact Potentiometry

**A.I. Alwaheba<sup>\*1</sup>, V.I. Surin<sup>\*2</sup>, T.E. Ivanova<sup>\*\*3</sup>, O.V. Ivanov<sup>\*\*4</sup>,  
V.G. Beketov<sup>\*\*\*5</sup>, V.A. Goshkoderov<sup>\*6</sup>**

<sup>\*</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

<sup>\*\*</sup>Tekhnoskan Company, Chernikov str., 2, building 31, sq. 162, Volgodonsk, Russia 347375

<sup>\*\*\*</sup>VETI NRNU MEPhI, Lenin street, 73/94. Volgodonsk, Russia 347360

<sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0002-9964-9146

e-mail: anas.kloub@jaec.gov.jo

<sup>2</sup>ORCID iD: 0000-0001-6153-0206

e-mail: visconst@rambler.ru

<sup>3</sup>ORCID iD: 0000-0003-0517-8898

e-mail: tehnoskan@mail.ru

<sup>4</sup>ORCID iD: 0000-0001-5302-8988

e-mail: iovoi@mail.ru

<sup>5</sup>ORCID iD: 0000-0003-0242-6745

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

<sup>6</sup>ORCID iD: 0000-0002-5526-6290

e-mail: vovagosh@mail.ru

**Abstract** – Scanning contact potentiometry (SCP) is used for defects detection and for determine the coordinates of the defects localized in welded joints. Studied samples are welded by manual arc welding of two halves austenitic steel 321H (Chromium-Nickel-titanium stainless Steel) dimension of each 200×110×13.5 mm. Thereafter welding, seam width is about 12 mm. Subsequently welded sample is inspected using X-ray radiographic testing system. In order to compare techniques capabilities, plotted potentiograms and weld radiograph are compared. Experimental outcomes prove that defects can be detected by SCP technique. SCP results are complied with mathematical signal analysis of defects. This method may substitute some destructive or nondestructive methods.

**Keywords:** Scanning contact potentiometry, nondestructive testing, welded joints, X-ray radiographic testing, Signal discrete transformation, Chromium-Nickel-titanium stainless Steel.