

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.53: 620.179.118 (075)

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
И КОНТРОЛЯ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2016 В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов, В.Д. Мотовилин, Н.В. Рейн

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

Диагностика реакторного оборудования, находящегося в эксплуатации в течение длительного времени, показывает, что процесс образования опасных макроскопических дефектов, таких как, круговые или продольные трещины, носит стадийный характер. Распределение трещин по размерам или глубине залегания в силовых элементах конструкций (кронштейны, каркасы, основания, опоры и др.) определяется методами неразрушающего контроля, такими как рентгеновский, ультразвуковой, вихретоковый, которые позволяют уверенно диагностировать объемные трещины с размерами от нескольких десятых миллиметров на глубине залегания нескольких миллиметров.

В настоящее время задача выявления коррозионных трещин на ранней стадии образования и определение причин их возникновения является актуальной. Например, для реакторов типа ВВЭР-1000 коррозионное растрескивание имеет место в узле приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора (зона сварного соединения №111). Как известно, причиной растрескивания являются отложения соединений железа и меди в виде шлама, который со временем накапливается в карманах узла приварки.

Цель работы – продемонстрировать достижения электрофизической диагностики и неразрушающего контроля и перспективы применения разработанного метода в условиях работы реакторного оборудования.

Ключевые слова: электрофизическая диагностика, неразрушающий контроль, сканирующая контактная потенциометрия, математическая модель для построения профиля поверхности, АЭС.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Применение вышеперечисленных методов неразрушающего контроля на действующем реакторном оборудовании представляет собой сложную задачу. В частности, трудности контроля сварного шва ультразвуковым методом связаны с тем, что образующиеся трещины характеризуются высокой степенью ветвления и большой протяженностью, а также имеют незначительное раскрытие, около 5-10 мкм [1].

Электрофизический неразрушающий контроль дает возможность получить информацию о начальных стадиях зарождения и развития трещин в рабочих условиях. Нами получены результаты по радиационной стойкости ядерного топлива на ранней стадии облучения, когда хрупкое разрушение образцов происходило при малоцикловых усталостных испытаниях [2,3].

Одно из главных преимуществ электрофизического контроля заключается в том, что датчики, имеющие малые линейные размеры (порядка нескольких миллиметров), могут быть размещены, практически, в любом труднодоступном месте. Они также могут быть размещены непосредственно на тех участках технологического оборудования, которые необходимо проконтролировать или, например, там, где ожидается появление трещины с высокой вероятностью. В основе электрофизической диагностики и контроля лежит метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) [4-7]. Датчики могут быть установлены равномерно на поверхности с заданной

линейной плотностью или произвольным образом, в количестве от нескольких единиц до нескольких десятков. Высокая надежность работы измерительной системы позволяют вести непрерывный мониторинг за выделенным участком объекта контроля, в том числе на сварных швах стыковых соединений, на оборудовании, находящемся в рабочих помещениях с повышенным радиационным фоном и в других особых случаях.

Приборы электрофизической диагностики и контроля могут найти широкое применение на атомных станциях. Как показывает опыт внедрения, высокий интерес к ним проявляется и в других отраслях промышленности.

ОСНОВЫ СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ

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 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. При использовании метода сканирующей контактной потенциометрии одним из основных вопросов является вопрос о состоянии поверхности контакта.

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 [8,9].

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.

В разработанных нами измерительных методиках принимается малым значение нормальной силы (силы поджатия преобразователя), при которой площадь реального контакта намного меньше площади номинального контакта.

Площадь поверхности реального контакта S может возрастать как при увеличении силы поджатия F , так и при возникновении волн упругой и пластической деформации, возникающих на поверхности деформированного металла. Деформационные волны, воздействуя на чувствительный элемент преобразователя, приводят к изменению его показаний.

Пластическая деформация материалов локализуется в поверхностных слоях деформируемого изделия в виде отдельных очагов с различной степенью ее проявления. Начальные стадии характеризуются одиночными линиями скольжения, переходящими в плотный набор параллельных линий (пачек скольжения). При увеличении деформации на поверхности образуются полосы скольжения, характерные для микроструктуры объема, а также волны поверхностной деформации, что

проявляется в целом как деформационная активность поверхности материалов. Это приводит к изменению свойств поверхности: механических, оптических и электрических. Деформационная активность поверхности связана с процессом течения в приповерхностных слоях, даже если прикладываемое напряжение значительно меньше предела текучести, вследствие наличия на поверхности концентраторов напряжений технологического происхождения [10]. Для исследования деформационной активности поверхности нами разработаны несколько математических моделей.

Рассмотрим взаимодействие грубой поверхности с плоскостью. Представим образующиеся на поверхности неровности как совокупность сфер радиуса R . Предположим, что функция высоты неровностей подчиняется закону нормального распределения. Предположим также, что можно пренебречь упругим взаимодействием неровностей в области контакта. На основе контактной теории Герца получены следующие характеристики [11,12]:

- нормализованная площадь контакта:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \pi n_0 R \int_{d_z}^{\infty} (h - d_z) p(h) dh, \quad (1)$$

- число контактирующих выступов на единице номинальной площади:

$$\frac{N}{S_0} = n_0 \int_{d_z}^{\infty} p(h) dh, \quad (2)$$

- величину прижимающего напряжения:

$$\sigma_{cl} = \frac{F}{S_0} = \frac{4E}{3(1-\nu^2)} n_0 \int_{d_z}^{\infty} (h - d_z)^{\frac{3}{2}} R^{\frac{1}{2}} p(h) dh, \quad (3)$$

где $d_p = (h - d_z)$; n_0 – число выступов на единичной площади;

h – высота неровностей;

d_z – величина зазора между взаимодействующими поверхностями;

$p(h)$ – плотность вероятности распределения выступов на поверхности;

E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

В одномерном случае амплитуды волновых векторов волнистости и шероховатости изменяются в узкой области значений вблизи q_m , а «решеточная постоянная» $\lambda_m = 2\pi/q_m$. В этом случае теория Гринвуда-Вильямсона дает оценку n_0 [12]:

$$n_0 \approx 0.029 q_m^2, \quad (4)$$

и радиуса сфер неровностей:

$$R \approx \frac{1}{\sqrt{2} q_m^2 \sigma}, \quad (5)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение параметра шероховатости.

Для постановки диагнозов при диагностировании развивающихся поверхностных дефектов, а также зарождающихся приповерхностных трещин, нами разработано программное обеспечение.

Очевидно, что распределение шероховатости на площадке пятна контакта h_i в каждый конкретный момент времени t_i различно, поскольку под нагрузкой в материале непрерывно протекают деформационные процессы.

Для определения шероховатости с помощью диагностического сигнала будем использовать полученную нами эмпирическую зависимость, связывающую

интегральные значения диагностического сигнала $\Delta\varphi_i$ (на площадке пятна контакта) и h_i [13]:

$$\Delta\varphi_i = \frac{eh_i}{\varepsilon_r\varepsilon_0} \int_0^L \delta n(z) dz, \quad (6)$$

где e – заряд электрона,

ε_0 – электрическая постоянная,

ε_r – диэлектрическая проницаемость среды,

L – предел интегрирования, обычно имеет порядок $\sim 10^{-9}$ м [14].

Под интегралом в (6) стоит функция изменения электронной плотности $\delta n(z)$ от координаты, где ось z перпендикулярна поверхности контакта. Функция $\delta n(z)$ характеризует изменение плотности электронов (в общем случае носителей заряда) в зазоре, который представляет собой пространство между взаимодействующими поверхностями. Для определения количества пятен контакта используются экспериментальные методы и расчетные оценки.

Согласно (6) в любой момент времени можно определить значение шероховатости, соответствующее значению диагностического сигнала, и построить ее зависимость от времени для любого выбранного места контакта на исследуемой поверхности. Диагностический сигнал разности электрических потенциалов представляет собой интегральное значение по числу образующихся пятен контакта. Для металлов и сплавов возникающий электрический контакт обеспечивает прохождение электрического тока через поверхность контакта. При этом образуются взаимодействующие поверхности, являющиеся эффективными барьерами для электронов проводимости. Между атомами этих поверхностей возникают силы, приводящие к коррелированным изменениям их электронных оболочек, и зависящие от величины зазора между поверхностями. Для получения зависимости между электрическими характеристиками и шероховатостью необходимо решить проблему перехода границы электронами на высоком структурном уровне [14].

Волны упругой и пластической деформации изменяют поверхностный рельеф (динамическая волнистость и шероховатость), что влияет на двойной электрический слой, локальную электронную плотность и распределение электрического потенциала на поверхности. Вследствие малой энергии образующихся механических волн, полезный сигнал имеет малую амплитуду и экранируется шумовой составляющей. С целью уменьшения влияния данной составляющей применяются программы обработки сигналов (рисунок 1). В ряде случаев используется двойная фильтрация сигнала, однако при этом может быть утеряна и часть полезной информации. На рисунке 1 видно влияние стадий последовательного нагружения образца на характер изменения амплитуды диагностического сигнала (АДС).

Дифференциальная разность электрических потенциалов возникает в замкнутой электрической цепи, содержащей два или более электрофизических преобразователя. При использовании метода *СКП* появляется возможность исследовать локальные поверхностные явления и изменения морфологии поверхностного слоя путем механического сканирования всей исследуемой поверхности.

Информативными параметрами диагностического сигнала являются: амплитуда, длительность, время появления отдельных гармоник, условная мощность электрического сигнала и некоторые другие параметры. Электрические сигналы характеризуются спектральной плотностью, амплитудным, временным и амплитудно-временным распределением, а также средним значением и дисперсией. Указанные параметры связаны с порождающими их физическими процессами и содержат информацию о них или же о состоянии объекта контроля.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНИСТОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВНОГО СЕРДЕЧНИКА ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ

Рассмотрим вопрос об определении шероховатости поверхности и оценки локальной (точечной) деформации топливного сердечника с помощью экспериментально-расчетного метода. Оценка проведена с целью получения критической величины зазора между топливом и оболочкой в условиях распухания и радиационной ползучести. Для этого были использованы результаты внутриреакторных испытаний карбонитридного ядерного топлива на реакторе ИРТ МИФИ [15,16]. В указанных работах впервые были продемонстрированы возможности применения метода *СКП* во внутриреакторных условиях.

Методика проведения измерений и требования к выбору электрофизических преобразователей зависят от условий проведения испытаний и подробно описаны в работе [17].

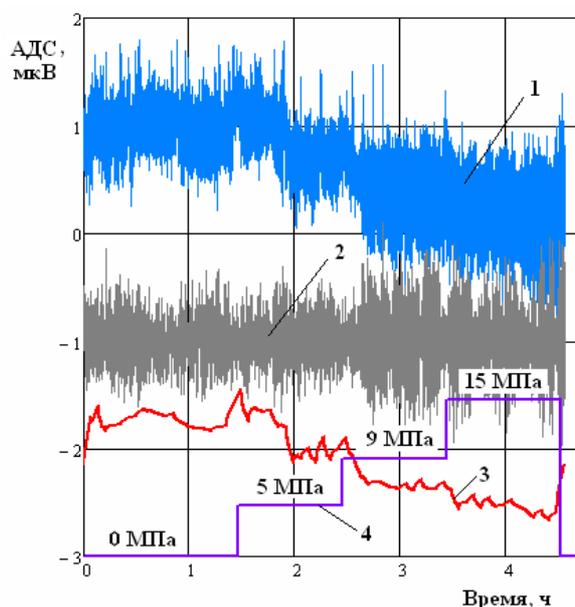


Рис. 1. – Обработка детектированного сигнала (1), полученного при одноосном растяжении алюминия технической чистоты, с помощью вейвлет-фильтра (график сдвинут вверх по оси ординат на 1,7 единиц). Шумовая составляющая сигнала (2) и полезный сигнал (3) сдвинуты вниз по оси ординат на одну единицу. В нижней части рисунка приведена диаграмма механического нагружения образца (4)

Моделирование поверхности топливного сердечника проводили на основе полученных результатов по радиационной температурно-силовой обработке нитридов и карбонитридов урана. Относительная деформация сердечника в результате температурно-силовых циклов имела высокое значение (до 0,3 и более), сопоставимое со значением деформации, при котором происходит контакт топлива с оболочкой.

Основная проблема моделирования поверхности с использованием электрофизической диагностики заключается в том, что функция распределение шероховатости, в выбранный момент времени, зависит от пространственных координат, а функция изменения диагностического сигнала – от времени. Связь временной функции и функции пространственных координат осуществлялась на основе разработанного нами подхода. Разложение диагностического сигнала в ряд Фурье выполнялось с целью определения частот гармоник, появляющихся на различных этапах эксперимента. Если предположить, что число пятен контакта в течение

эксперимента сохраняется, то должна изменяться площадь контактов, ее рост или уменьшение. Возможно, что в процессе эксперимента некоторые пятна контактов исчезают, но вследствие динамики процесса, образуются новые. Число гармоник, получавшееся при разложении в ряд Фурье диагностического сигнала, коррелировало с количеством взаимодействующих выступов и впадин на площадках пятен контактов, динамически изменяющихся во времени.

В соответствии с методикой измерений, одна из площадок контакта выбиралась максимально удаленной от места локализации деформации. В этом случае контактная разность потенциалов, возникающая между образцом и преобразователем на данной площадке, слабо изменялась во времени, поскольку число взаимодействующих выступов на ней во времени оставалось примерно постоянным.

В другой области контакта, где происходит активный процесс образования деформации, напротив, число пятен контакта во времени интенсивно изменялось. Если учитывать только большие по площади пятна контактов (с линейными размерами от десятых долей миллиметра и более), то их число можно определить на основе теории Гринвуда-Вильямсона, а изменяющуюся во времени шероховатость – по диагностическому сигналу, используя выражение (6).

Задача заключалась в построении распределения шероховатости (волнистости) на поверхности пятна контакта по значениям диагностического параметра и была разбита на несколько расчетных этапов:

- построение распределения шероховатости на поверхности образца перед проведением испытаний (проводилось на основе результатов профилометрии) и определение начального значения шероховатости h_0 ;
- статистическая обработка диагностических сигналов (определение среднего, среднеквадратического отклонения, дисперсии и др.) и построение гистограммы распределения амплитуды;
- расчет параметров шероховатости по значениям диагностического сигнала;
- моделирование шероховатости поверхности с помощью математических функций таким образом, чтобы полученное значение шероховатости по модели соответствовало расчетному значению по диагностическому сигналу.

На рисунке 2 приведены полученные результаты изменения шероховатости поверхности топливного сердечника под облучением.

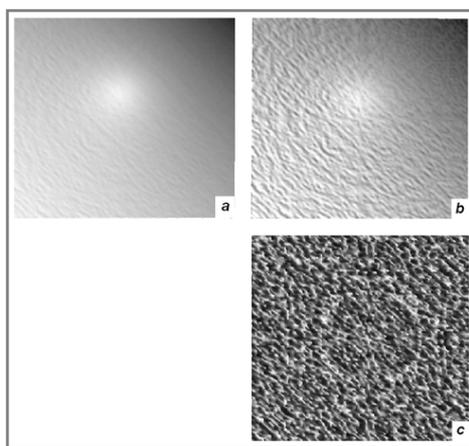


Рис. 2. – Моделирование волнистости и шероховатости поверхности карбонитрида урана на разных стадиях эксперимента: *a* - начальная шероховатость до облучения ($Ra = 5-10$ мкм). Поверхность построена по фоновому значению диагностического сигнала; *b* – увеличение параметра волнистости в результате радиационной температурно-силовой обработки; *c* – формирование кольцевого контура контакта преобразователя с поверхностью образца

Расчетное значение деформации $\varepsilon_{\text{расч}}$ определяли интегрированием квадрата функции диагностического сигнала в заданном временном интервале:

$$\varepsilon_{\text{расч}} = A \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi)^2 dt, \quad (7)$$

$$A = \frac{1}{\sigma \cdot V \cdot \rho},$$

где σ – приложенное механическое напряжение;
 V – объем образца;
 ρ – подгоночная функция, имеющая размерность Ом.

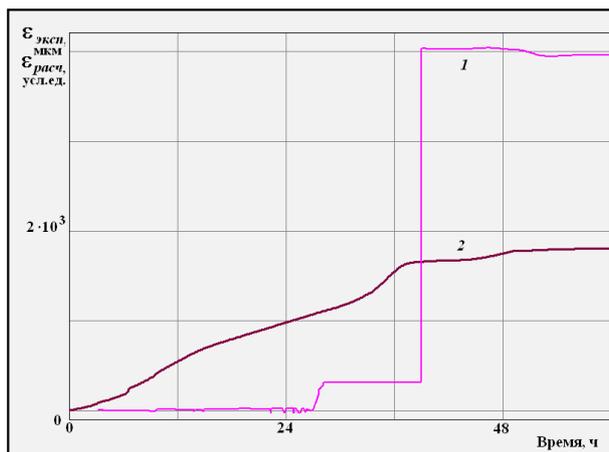


Рис. 3. – Изменение деформации карбонитрида урана в процессе внутриреакторных испытаний: кривая (1) – эксперимент ($\varepsilon_{\text{эксп}}$, в мкм); кривая (2) – расчет ($\varepsilon_{\text{расч}}$ в условных ед.) [13]

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Для количественной оценки технического состояния изделий (труба электросварная прямошовная круглая ГОСТ 10704-91, $\varnothing 219$ мм, толщина стенки 6 мм, сталь 20) трубопровода сжатого воздуха инженерного корпуса Московской печатной фабрики - филиала АО Гознак был применен метод СКП. При проведении работ была использована мобильная информационно-измерительная система (ИИС) на базе ноутбука Asus X554L и сертифицированного прибора ЭДСС-1 (рис. 4).

Программный комплекс, входящий в расчетно-программный модуль ИИС позволяет оперативно обрабатывать поступающую информацию, формировать базу данных и производить необходимые расчеты в среде *MathCAD*, а также содержит тестовые и диагностические программы, программы расчета и визуализации полученных результатов.

Электрофизический контроль трубопровода сжатого воздуха проводился при пуско-наладочных работах с целью определения качества сварных швов и выявления возможных нарушений и дефектов. При испытаниях использовались и стационарные электрофизические датчики неразрушающего контроля (рис.5).

Труба для подачи сжатого воздуха была сварена из шести частей, имела два изгиба и пять сварных швов. Все швы выполнены электродуговой сваркой.

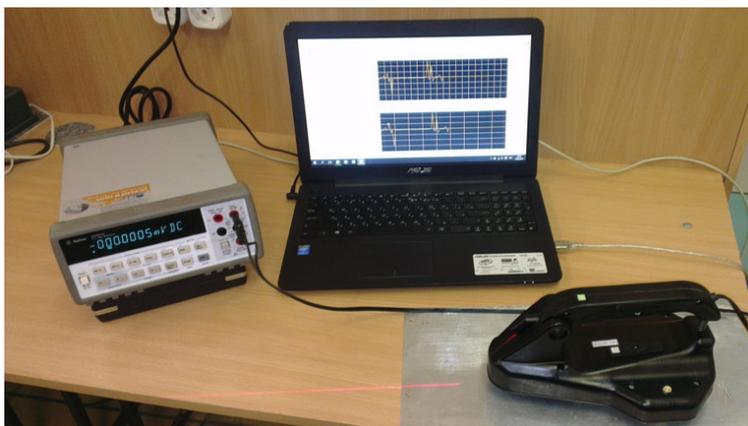


Рис. 4. – Переносной комплекс функциональной электрофизической диагностики с прибором ЭДСС-1 (внизу в правой части фото)

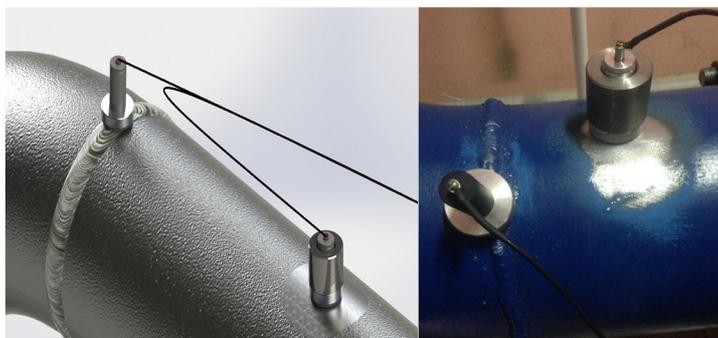


Рис. 5. – Монтаж стационарных электрофизических датчиков на объекте контроля

В работе использовались стационарные датчики с коническими преобразователями (угол конуса близок к 90 градусам), имеющими радиус скругления вершины 0,3 мм. Шероховатость поверхности (R_a) чувствительного элемента, измеренная цифровым портативным профилометром фирмы *Vogel*, приведены в таблице 1. Шероховатость поверхности определяет порог чувствительности. Преобразователи были изготовлены из сплавов Д16Т (ГОСТ 21488-97), Х18Н10Т (ГОСТ 14955-77), латуни ЛС 59-1 (ГОСТ 15527-2004) и меди М1 (ГОСТ 859-2001).

Таблица 1. – Шероховатость поверхности электрофизических преобразователей

Материал преобразователя	Шероховатость R_a , мкм
Д16Т	0,08
Х18Н10Т	0,15
ЛС 59-1	0,23
М1	0,10

Результаты диагностирования трубопровода сжатого воздуха для трех швов представлены в таблице 2, где указаны полученные средние значения диагностического сигнала для каждой выборки проведенных измерений. Характеристиками объекта сварного шва являются «наплыв», «загрязненный участок» и «очищенный участок».

Таблица 2. – Характеристика объекта сварного шва и средние значения диагностического сигнала для использованных преобразователей

Материал преобразователя	Характеристика объекта сварного шва		
	Наплыв	Загрязнённый участок	Очищенный участок
1 шов			
Д16Т	$2,390 \cdot 10^{-7}$	$1,119 \cdot 10^{-4}$	$1,586 \cdot 10^{-7}$
X18H10T	$1,835 \cdot 10^{-6}$	$1,827 \cdot 10^{-4}$	$3,484 \cdot 10^{-6}$
ЛС59-1	$4,671 \cdot 10^{-7}$	$1,527 \cdot 10^{-4}$	$6,915 \cdot 10^{-7}$
М1	$2,089 \cdot 10^{-6}$	$1,085 \cdot 10^{-4}$	$2,253 \cdot 10^{-6}$
2 шов			
Д16Т	$5,705 \cdot 10^{-6}$	$8,852 \cdot 10^{-6}$	$2,236 \cdot 10^{-6}$
X18H10T	$5,337 \cdot 10^{-6}$	–	$1,210 \cdot 10^{-5}$
ЛС59-1	$2,872 \cdot 10^{-6}$	$8,533 \cdot 10^{-5}$	$3,302 \cdot 10^{-6}$
М1	$9,543 \cdot 10^{-6}$	$1,146 \cdot 10^{-4}$	$8,061 \cdot 10^{-6}$
3 шов			
Д16Т	$2,416 \cdot 10^{-5}$	$2,316 \cdot 10^{-4}$	$3,201 \cdot 10^{-5}$
X18H10T	$3,169 \cdot 10^{-5}$	$2,037 \cdot 10^{-5}$	$2,963 \cdot 10^{-5}$
ЛС59-1	$4,450 \cdot 10^{-5}$	$2,400 \cdot 10^{-4}$	$3,005 \cdot 10^{-5}$
М1	$4,984 \cdot 10^{-5}$	$9,189 \cdot 10^{-5}$	$5,424 \cdot 10^{-5}$

Анализ результатов показывает, что для наплыва разность электрических потенциалов растет заметно от первого шва до четвертого, потом падает на пятом шве. Это связано с более высокой температурой окружающей среды для третьего и особенно четвертого швов, расположенных в верхней части помещения. Показания возрастают в результате появления дополнительной термо-эдс.

На основе выработанных критериев поставлен диагноз по результатам электрофизической диагностики, при этом использовались имеющиеся данные из архива электронной библиотеки лаборатории *ElphysLAB* НИЯУ МИФИ. Определены регламентирующие пороговые значения диагностического сигнала и соответствующие показатели разности электрических потенциалов для представления заключения о проведенной работе.

Полученные в работе показания лежат в допустимых пределах, характерных для сталей данного класса. При диагностировании не получено критических значений сигнала, влияющих на условия штатной эксплуатации трубопровода.

ВЫВОДЫ

Продемонстрированы перспективы использования методов функциональной электрофизической диагностики в атомной отрасли на примерах исследования радиационной стойкости ядерного топлива и оценки технического состояния трубопровода сжатого воздуха инженерного корпуса Московской печатной фабрики – филиала АО Гознак. Приведены теоретические аспекты метода сканирующей контактной потенциометрии, лежащего в основе функциональной электрофизической диагностики, а также основные положения математической модели для построения профиля диагностируемой поверхности. Использование переносного комплекса функциональной электрофизической диагностики позволит оперативно проводить неразрушающий контроль на технологическом оборудовании атомных станций. Разработан программный комплекс, входящий в расчетно-программный модуль *ИИС*, который обеспечивает обработку поступающей информации, формирует базу данных и

производит необходимые расчеты, содержит тестовые и диагностические программы, а также программы визуализации полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казанцев, А.* Как развиваются трещины? [Текст] / А.Казанцев // РЭА. – 2016. – №2. – С. 28–35.
2. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment. International Conference «Nuclear Energy for New Europe 2010», Nuclear Society of Slovenia, Book of Abstracts, pp. 58–59.
3. *Арефинкина, С.Е. и др.* Построение деформации и профиля поверхности ядерного топлива по результатам функциональной электрофизической диагностики [Текст] / С.Е. Арефинкина, А.М. Гладцин, Е.В. Рябиковская, В.И. Сурин // Препринт №IBRAE-2015-01.– М.: ИБРАЭ РАН, 2015. – С. 19–22.
4. *Белова, В.С. и др.* Информационно-измерительная система для внутриреакторных исследований материалов [Текст] / В.С. Белова, Н.А. Евстюхин, А.А. Морозов, В.И. Сурин // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – №1. – С. 39–47.
5. *Сурин, В.И. и др.* Диагностика образования и роста усталостных трещин в тонких металлических пластинах [Текст] / В.И. Сурин, В.И. Занько, А.П. Бирюков // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – №3. – С. 71–77.
6. Arefinkina S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials. Modern problems of theory machines. North Charleston, USA, 2016, №4, pp. 177–183.
7. *Арефинкина, С.Е. и др.* Результаты обработки диагностических сигналов при испытаниях материалов на прочность и усталость [Текст] / С.Е. Арефинкина, В.И. Сурин // Современные проблемы теории машин. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2016, №4, С. 26–30.
8. *Тейбор, Д.* Современное состояние представлений о механизме трения [Текст] / Д. Тейбор // Проблемы трения и смазки. – 1981. – Т.103. – №2. – С. 1–19.
9. *Дроздов, Ю.Н. и др.* Противозадирная стойкость трущихся тел [Текст] / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Арчegov, В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1981. – 140 с.
10. *Штремель, М.А.* Прочность сплавов [Текст] / М.А. Штремель. Часть II. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
11. Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces. Surface Science Reports, 2006, Vol. 61, pp. 201–227.
12. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966, Vol. 295, pp. 300–319.
13. Ryabikovskaya E.V., Arefinkina S.E., Surin V.I. Modeling of fuel kernel surface profile based on results of functional electrophysical diagnostics. ICONE 23. The 23rd International Conference on Nuclear Engineering, Chiba, Japan, 2015.
14. Ferrante J., Smith J.R. Theory of bimetallic interface// Physical. Review. B. 1985, Vol.31, pp. 3427–3434.
15. *Сурин, В.И. и др.* Об использовании метода электросопротивления и термо-эдс в реакторных условиях [Текст] / В.И. Сурин, Н.А. Евстюхин, В.И. Князев, С.Н. Тарасов, К.Л. Писаренко // Техника реакторного эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 80–85.
16. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I. Conductivity of fission-damaged uranium nitride. Journal of Nuclear Materials. 1995, Vol. 218, pp. 268–272.
17. Сурин В.И., Евстюхин Н.А. Электрофизические методы неразрушающего контроля и исследования реакторных материалов [Текст] / В.И. Сурин, Н.А. Евстюхин. – М.: МИФИ, 2008. – 168 с.

REFERENCES

- [1] Kazantsev A. Kak razvivayutsja treschiny [How to develop cracks?]. REA. 2016, №2, pp. 28-35. (in Russian).
- [2] Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment//International Conference «Nuclear Energy for New Europe 2010», Nuclear Society of Slovenia, Book of Abstracts, pp. 58–59. (in English)
- [3] Arefinkina S.E. etc. Postroenie deformatsii i profilja poverkhnosti iadernogo topliva po rezultatam funktsionalnoi elektrofizicheskoi diagnostiki [Construction and profile deformation of nuclear fuel surface as a result of functional electrophysical diagnostics] Preprint № IBRAE-2015-01. Pub. Nuclear Safety Institute, 2015. pp. 19–22. (in Russian).
- [4] Belova V.S. etc. Informational-measuring system for in-core research materials [Information

- technology in the design and industrial]. 2010, ISSN 2073-2597, №1, pp.39-47. (in Russian).
- [5] Surin V.I. etc. Diagnosis of the formation and growth of fatigue cracks in the thin metal plates [Information technology in the design and industrial]. 2010, ISSN 2073-2597, №3, pp.71–77. (in English)
- [6] Arefinkina S.E. etc. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials [Modern problems of theory machines]. Pub. North Charleston, USA, 2016, ISSN 2307-342X, № 4, pp. 177–183. (in English)
- [7] Arefinkina S.E. etc. Rezultaty obrabotki diagnosticheskikh signalov pri ispytaniakh materialov na prochnost i ustalost [The results of processing diagnostic signals when testing materials for durability and fatigue]. Sovremennye problemy teorii mashin [Modern Problems of Theory mashin]. Pub. Novokuznetsk: SIC MS, 2016, №4, pp. 26–30. (in Russian).
- [8] Tabor D. Sovremennoe sostoianie predstavlenii o mekhanizme treniia [Current state ideas about the mechanism of friction and friction]. Problemy smazky [Problems smazki], 1981, Vol. 103, №2, pp.1–19. (in Russian).
- [9] Drozdov Y.N., Arhegov V.G., Smirnov V.I. Protivozadirnaia stoikost trushchikhsia tel [Extreme pressure resistance of rubbing bodies]. Pub. Nauka, 198, 140 p. (in Russian).
- [10] Shtremel M.A. Prochnost splavov [The strength of the alloys]. Part II. Pub. MISA, 1997, 527 p. (in Russian).
- [11] Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces. Surface Science Reports. 2006, ISSN 0167-5729, Vol.61, pp. 201-227. (in English)
- [12] Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966, Vol. 295, pp. 300–319. (in English)
- [13] Ryabikovskaya E.V., Arefinkina S.E., Surin V.I. Modeling of fuel kernel surface profile based on results of functional electrophysical diagnostics. ICONE23-1163. The 23rd International Conference on Nuclear Engineering, Pub. Chiba, Japan, 2015. (in English)
- [14] Ferrante J., Smith J.R. Theory of bimetallic interface. Physical. Review. B. 1985, ISSN 1098-0121, Vol.31, pp. 3427–3434. (in English)
- [15] Surin V.I. etc. Ob ispolzovanii metoda elektrosoprotivleniia i termo-eds v reaktornykh usloviakh [The use of the method of electrical resistivity and thermoelectric power in the reactor conditions]. Tekhnika reaktornogo eksperimenta [Technique reactor experiment]. Pub. Energoatomisdat, 1987, pp. 80–85. (in Russian).
- [16] Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I. Conductivity of fission-damaged uranium nitride. Journal of Nuclear Materials. 1995, ISSN 0022-3115, Vol. 218, pp. 268–272. (in English)
- [17] Surin V.I., Evstyukhin N.A. Elektrofizicheskie metody nerazrushaiushchego kontrolya i issledovaniia reaktornykh materialov [Electrophysical methods of nondestructive testing and materials research reactor]. Pub. Moscow Engineering Physics Institute, 2008, 168 p. (in Russian).

The Electrophysical Diagnosis Methods and Reactor Equipment Control

V.I. Surin*, Z.S. Volkova**, R.A. Denisov, V.D. Motovilin, N.V. Rhine

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

**e-mail: VIsurin@mephi.ru; **e-mail: volkovazs@rambler.ru*

Abstract – The detect corrosion cracks at an early stage of formation and determination of their causes is important. For example, PWR-1000 corrosion cracking occurs in the welding unit coolant reservoir to the body of the steam generator (welded joint zone № 111). It is known to cause cracking of the deposits are iron and copper compounds in the form of sludge that accumulates with time in the pockets welding assembly. Objectives: The theoretical aspects of the method of scanning contact potentiometry underlying functional electrophysical diagnostics are discussed, and a summary of the mathematical model to build the profile of the surface diagnosed is given. Using portable electrophysical complex functional diagnostics will allow us to carry out non-destructive testing on the process equipment of nuclear power plants. A software package included in the settlement and software module that provides processing of incoming information creates the database and make the necessary calculations, contains test and diagnostic programs, as well as visualization of the results.

Keywords: electrophysical diagnostics and non-destructive testing, scanning the contact potentiometry, a mathematical model for the construction of the surface profile according to the electric potential difference function, NPP.