DOI: 10.17122/ntj-oil-2017-4-171-185

УДК 620.196:622.276.012.05

А.Т. Фаритов (ГАНУ «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан», г. Уфа, Российская Федерация), **Д.А. Чепайкин, А.А. Сазонов** (ООО Научно-производственная фирма «Акрус-М», г. Уфа, Российская Федерация), **А.В. Сисанбаев** (ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН», г. Уфа, Российская Федерация), **Г.С. Мурзагулов** (ГАНУ «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан», г. Уфа, Российская Федерация)

АНАЛИЗ МЕТОДА CMAS (COUPLED MULTIELECTRODE ARRAY SENSORS) ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ

A.T. Faritov (Institute for Strategic Researches of Republic of Bashkortostan, State Autonomous Scientific Department, Ufa, Russian Federation), **D.A. Chepaykin, A.A. Sazonov** (Research and Production Firm «Akrus-M» Ltd, Ufa, Russian Federation), **A.V. Sisanbaev** (Institute for Problems of Metal Superplasticity of Russian Academy of Sciences, Federal State Budgetary Institution of Science, Ufa, Russian Federation), **G.S. Murzagulov** (Institute for Strategic Researches of Republic of Bashkortostan, State Autonomous Scientific Department, Ufa, Russian Federation)

ANALYSIS OF THE METHOD CMAS (COUPLED MULTIELECTRODE ARRAY SENSORS) FOR LOCAL CORROSION DETERMINATION

Введение

Рассмотрены возможности метода CMAS (Coupled Multielectrode Array Sensors) для контроля коррозии и представлены результаты 24-дневного сравнительного эксперимента, где наряду с этим методом были использованы метод LPR, гравиметрия и лазерная микроскопия поверхности образцов.

Решение данной задачи состояло из анализа теоретических основ метода и его экспериментальной проверки.

Цели и задачи

Целью исследования является получение аргументированных выводов о целесообразности применения метода CMAS для контроля локальной коррозии.

Методы

В работе использованы графоаналитический метод анализа поляризационных кривых многоэлектродного датчика и решение системы уравнений, составленной на

Background

In the article the possibilities of CMAS (Coupled Multielectrode Array Sensors) method for corrosion control are considered and the results of 24-day comparative experiment, in which along with this method there were used method LPR, gravimetry and laser microscopy of the sample surface are presented.

The solution of this problem included analysis of the theoretical foundations of this method and its experimental verification.

Aims and Objectives

The aim of this research is to obtain reasoned conclusions about the advisability of applying the method CMAS for determination of local corrosion.

Methods

The authors used graphoanalytical method for analyzing the polarization curves of a multielectrode sensor and solving the system of

основе сведений о прямолинейном характере зависимости «потенциал - логарифм тока» в практически используемом диапазоне значений анодного тока. Проверка сходимости метода CMAS осуществлялась на экспериментальной установке «Монитор-стенд-А» с использованием гравиметрического метода контроля коррозии, а также метода LPR и лазерной сканирующей микроскопии поверхности образцов.

Результаты

На основе проведенной работы даны рекомендации применимости метода CMAS для контроля локальной коррозии и выявлены условия, при которых метод может давать некорректные результаты.

equations, compiled on the basis of information on rectilinear dependence «potential - logarithm of current» in the practically used range of anode current values.

The verification of the convergence of CMAS method was carried out on an experimental stand «Monicor-Stand-A» using method LPR, gravimetry and laser microscopy of the sample surface.

Results

On the basis of the work, recommendations are given for the applicability of the CMAS method for controlling local corrosion and identified the conditions under which the method can give incorrect results.

Ключевые слова: контроль коррозии, скорость коррозии, метод CMAS, метод LPR, лазерная сканирующая микроскопия

Key words: corrosion control, corrosion rate, method CMAS, method LPR, laser microscopy

Метод определения скорости коррозии с использованием «связанных многоэлектродных датчиков» (Coupled Multielectrode Array Sensors (CMAS)) является одной из новых разработок за последнее время [1-7]. В статье рассмотрены вопросы применимости этого метода контроля коррозии для использования на практике.

Метод CMAS основан на определении скорости локальной коррозии путем измерения тока, возникающего между 10...40 идентичными стальными электродами многоэлектродного датчика [8, 9]; не исключается использование электродов из других электропроводных материалов. Предполагается, что в системе электродов происходит стохастическое распределение анодных и катодных участков, аналогично тому, как это происходит на поверхности металла при язвенной или иной местной коррозии. Авторы метода признают, что это огрубленное представление корродирующей поверхности и что на каждом электроде датчика могут также происходить анодные и катодные реакции, приво-

дящие к возникновению внутреннего тока электрода, который невозможно определить прямыми измерениями. Метод CMAS исходит из предположения об отсутствии внутреннего электрического тока на поверхности наиболее разрушаемого электрода [10]. Для решения проблемы внутреннего тока при измерении силы тока из системы могут исключаться все анодные электроды, кроме самого анодного, что, по мнению авторов, должно снизить влияние внутреннего тока на результат измерения скорости локальной коррозии.

Рассмотрим применимость данного подхода, приняв, что датчик CMAS состоит из большого количества электродов, между которыми в различных комбинациях можно измерять возникающий ток.

При большом числе электродов для получения катодной кривой системы суммируют катодные кривые всех электродов, аналогично для определения суммарной анодной кривой - все анодные кривые. Точка пересечения этих суммарных кривых дает общую силу тока коррозии системы $I_{\text{сист}}$, а также стационар-

ный потенциал системы $\varphi_{\text{стац}}$. Плотность тока и, соответственно, средняя скорость коррозии системы определяется делением общей силы тока на площадь поверхности системы, т.е. всех электродов. Скорость коррозии каждого электрода графоаналитически определяется как ток на анодной кривой электрода, соответствующий потенциалу системы $\varphi_{\text{стац}}$, деленный на площадь электрода.

В качестве примера многоэлектродной системы на рисунке 1 в координатах «потенциал - логарифм тока» изображен процесс электрохимической коррозии системы, состоящей из 4-х электродов. Считается, что при электрохимической коррозии анодные графики в координатах «потенциал - десятичный логарифм тока» имеют прямолинейный характер при плотностях анодного тока, превышающих $0,001 \text{ мА/см}^2$ [11]. Эта плотность тока соответствует достаточно низкой скорости коррозии $0,012 \text{ мм/год}$, поэтому для имеющих практическое значение случаев анодную реакцию допустимо считать прямолинейной в полулогарифмических координатах. Вид катодных кривых для анализа не имеет особого значения.

На графиках рисунка 1 в точках пересечения локальных анодных и катодных линий показаны потенциалы отдельных электродов φ_1, φ_4 в момент, когда они еще не замкнуты между собой. В этой системе самый анодный электрод имеет потенциал φ_1 . При замыкании его с другими электродами его потенциал сдвинется до $\varphi_{\text{стац}}$ (для упрощения считаем, что омическое сопротивление среды равно нулю). При этом возникнет максимальный анодный ток $I_{\text{а.факт}}$, который и определяет максимальную скорость коррозии среди электродов многоэлектродного датчика при их электрическом замыкании между собой. Однако измерить $I_{\text{а.факт}}$ прямым способом невозможно, так как максимальный анодный ток определяется как сумма внутреннего тока коррозии электрода $I_{\text{внтр}}$ в незамкнутой системе и измеренного амперметром тока $I_{\text{изм}}$ между электродом 1 и системой, состоящей из замкнутых между собой остальных электродов. При этом происходит смещение потенциала анода 1 на $\varphi_{\text{смещ}}$. Определим условия, когда измеренный ток $I_{\text{изм}}$ близок к максимальному анодному $I_{\text{а.факт}}$, что и определяет условия применимости метода CMAS.

Рисунок 1. Схема процессов коррозии на датчике CMAS

Для анодной кривой самого анодного электрода 1 системы, показанной на рисунке 1, можно написать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \varphi_1 = a + b \cdot \lg I_{\text{внтр}}, \\ \varphi_{\text{стац}} = a + b \cdot \lg I_{\text{а.факт}}, \\ I_{\text{а.факт}} = I_{\text{внтр}} + I_{\text{изм}}, \end{cases}$$

из которой следует:

$$I_{\text{а.факт}} = \frac{I_{\text{изм}}}{1 - 10^{\frac{\varphi_1 - \varphi_{\text{стац}}}{b}}}. \quad (1)$$

Так как смещение от стандартного потенциала анодов - величина отрицательная ($\varphi_1 - \varphi_{\text{а.ст}} < 0$), а коэффициент наклона анодной кривой b - положительная (т.к. направление оси ординат отрицательное), при смещениях, превышающих величину b , можно считать, что измеренное значение силы тока близко к фактическому анодному току (составляет более 90 % от него). Величина b анодной реакции находится в пределах 60-120 мВ. Таким образом, достаточным минимальным смещением потенциала можно считать величину 60-120 мВ. При этом показатель степени 10 будет менее чем минус 1, т.е. знаменатель дроби будет более 0,9. Однако, надо отметить что смещение потенциала, равное 60-120 мВ, - очень большая величина для реальных многоэлектродных систем, выполненных из одного металла. Как правило, потенциалы таких электродов отличаются между собой не более чем на 20 мВ. Если же смещение потенциала почти отсутствует, что может наблюдаться при равномерной коррозии, то измеренная величина тока будет многократно меньше фактической и это приведет к очень низким показаниям прибора вне зависимости от наблюдаемой скорости коррозии.

Смещение потенциала системы в катодную область за счет отключения других анодных электродов естественно увеличивает $I_{\text{изм}}$, как предлагают авторы метода для повышения точности результатов, однако это не совсем корректно действие, т.к. при этом искусственно меняет стохастически образовавшийся потенциал коррозии, а ток анодного электрода увеличивается до величин, которые фактически в системе не наблюдаются.

Рассмотрим также, насколько могут различаться стационарные потенциалы электродов при водородной и кислородной деполяризациях. Стандартные потенциалы железного анода и равновесные потенциалы возможных реакций на катоде в зависимости от парциальных давлений водорода и кислорода и pH среды представлены в таблице 1 [12]. Разница между ними определяет теоретический диапазон возможных значений анодных и катодных реакций на железе.

Таким образом, можно предсказать, что метод CMAS имеет большую сходимость в условиях, когда стандартные анодные и равновесные катодные потенциалы наиболее удалены друг от друга. Это наблюдается для коррозии с кислородной деполяризацией во всем диапазоне pH и с водородной в сильно кислых средах. В нейтральных средах «начальные» потенциалы катодной реакции с водородной деполяризацией и анодной достаточно близки, поэтому диапазоны смещений потенциалов (максимальное возможное смещение - это разница между стандартным потенциалом анода и равновесным потенциалом катода) будут низкими, а погрешность метода, соответственно, - высокой.

Таблица 1. Стандартные потенциалы анода и равновесные потенциалы возможных реакций на катоде в зависимости pH среды и парциальных давлений

Реакция и парциальное давление ее проведения	$\Phi_{\text{станд (равновесн)}}, \text{ В}$		
	pH=0	pH=7	pH=14
$\text{Fe}^{2+} \text{Fe}$	-0,447	-0,447	-0,447
$2\text{H}^+ \text{H}_2, P_{\text{H}_2} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ МПа (воздух)}$	0,186	-0,228	-0,641
$2\text{H}^+ \text{H}_2, P_{\text{H}_2} = 0,1 \text{ МПа}$	0	-0,414	-0,828
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ 2\text{OH}^-, P_{\text{O}_2} = 0,21 \text{ МПа}$	1,218	0,805	0,338
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ 2\text{OH}^-, P_{\text{O}_2} = 0,1 \text{ МПа}$	1,229	0,815	0,400

Следует отметить, что таблица 1 не учитывает потенциалы реакций компонентов стали, на которых могут происходить реакции с другими равновесными потенциалами, поэтому может служить только ориентиром ожиданий.

Стохастическое распределение потенциалов на поверхности корродирующего металла по методу CMAS моделируется одинаковыми по свойствам электродами в количестве от 10 до 40, что также в некоторых случаях может оказаться недостаточным по причине их малого количества (так называемый масштабный фактор) - ведь такое количество электродов равносильно моделированию ситуации, когда язвенной коррозией занято 2,5-10 % поверхности металла. На практике доля занятой язвами площади, как правило, значительно меньше: так, количество отказов по причине язвенной коррозии на однородных, с точки зрения гидравлики потока аварийных участках составляет обычно 1-3 случая/км, что при площади язвы, к примеру, $0,0002 \text{ м}^2$ (2 см^2) и площади поверхности 1 км трубопровода диаметром 200 мм, равной 628 м^2 , составляет всего 0,00003 %.

Таким образом, вероятность «поймать» самый активный максимум коррозии при таком количестве электродов на датчике достаточно мала. Поэтому получаемые значения скорости локальной коррозии на датчике, который состоит из небольшого по сравнению с реальной системой количества электродов, правильнее будет интерпретировать не как локальную коррозию трубопровода, а как среднюю скорость коррозии на 10 % самых корродируемых участках при использовании 10-электродного датчика и 2,5 % - при использовании 40-электродного датчика. Конечно, и это только в том случае, когда при измерении возникают условия для получения достаточного смещения потенциала самого анодного участка. В случае отсутствия достаточного смещения (в качестве рекомендации производителям прибора рекомендуется выводить его) показания прибора будут заведомо очень низкими и, соответственно, не достаточно корректными.

Резюмируя данный анализ, можно предположить, что метод CMAS вряд ли бу-

дет определять локальную скорость коррозии во всех случаях, т.к. в нем не компенсируется внутренний ток анодного электрода, но в некоторых случаях, когда создаются условия, когда его влияние пренебрежимо мало, с помощью него можно с достаточно высокой точностью определить максимальную скорость коррозии на датчике.

Сам подход, заложенный в данном методе, должен оказаться практически полезным, т.к. других методов электронного контроля коррозии, которые бы позволяли прямыми измерениями определять скорость локальной коррозии в настоящее время, не существует. Методы, связанные с гистерезисом поляризационной кривой, которые пропагандируются в качестве таковых, могут иметь множество интерпретаций, не связанных с локальной коррозией, что не позволяет доверять им в полной мере.

Постулируемая авторами возможность измерения методом CMAS в безводных средах не имеет теоретического обоснования, так как метод работает только при наличии водной среды между электродами, между которыми проводится замер тока.

Для проверки высказанных предположений были проведены экспериментальные работы с использованием автоматизированной пилотной установки «Монитор-Стенд-А», разработанной ООО НПФ «Акрус-М», на которой были проведены сравнительные испытания двух электронных методов измерения скорости коррозии CMAS и LPR в сравнении с гравиметрическим, в условиях максимально приближенных к реальным.

Пилотная установка «Монитор-Стенд-А» в циркуляционном исполнении предназначена для проведения коррозионно-метрических испытаний ингибиторов коррозии и образцов различных металлов в автоматически контролируемом по наиболее важным, с точки зрения коррозии, параметрам потока рабочей среды.

Основными, определяющими скорость и механизм коррозии, контролируемыми и автоматически поддерживаемыми параметрами потока рабочей среды являются температура и скорость потока, а также содержание в нем углекислого газа, сероводорода,

Обозначения на принципиальной схеме пилотной установки:

- 1 - Основная емкость
 - 2 - Масляный электронагреватель
 - 3 - Расширительный бак
 - 4 - Радиатор охлаждения основной емкости
 - 6 - Заливная горловина
 - 7 - Выход датчика H_2S и CO_2
 - 8 - Радиатор охлаждения блока пробоподготовки
 - 9 - Нагреватель блока пробоподготовки
 - 10 - Датчик влажности и температуры для блока пробоподготовки
 - 11 - Выход в вытяжку
 - 12 - Блок пробоподготовки
 - 13 - Датчики давления на основной емкости
 - 14 - Датчик уровня на основной емкости
 - 15 - Манометр
 - 16 - Ввод O_2 , CO_2 , N_2 в основную емкость
 - 17 - Ввод H_2S в емкость с сероводородной водой
 - 18 - Выход в вытяжку емкости с сероводородной водой
 - 19 - Датчик давления на емкости с сероводородсодержащей водой
 - 20 - Датчик уровня на емкости с сероводородсодержащей водой
 - 21 - Манометр на емкости с сероводородсодержащей водой
 - 22 - Ввод сероводородной воды в стенд
 - 23 - Емкость с сероводородной водой
 - 26 - Ввод для датчика скорости коррозии Nanocorr
 - 28 - Прибор для измерения локальной коррозии Nanocorr
 - 29 - Расходомер
 - 30 - Точка ввода ингибитора коррозии
 - 31 - Датчик измерителя скорости коррозии «Монитор»
 - 32 - Датчик pH
 - 33 - Датчик растворенного кислорода
 - 34 - Шкаф управления с программируемым логическим контроллером
 - 35 - АРМ оператора (SCADA система) для управления установкой
- * Вспомогательные позиции 5, 24, 25, 27 на рисунке не отображены.

Обсуждение результатов

Ход эксперимента, средние и средние за 24 дня результаты, полученные по электронным датчикам, включая датчики LPR и CMAS, приведены в таблице 2. Данные по скоростям коррозии по гравиметрическому методу приведены в таблице 3. Графики ос-

новных контролируемых показателей эксперимента приведены на рисунке 3. Профилограммы исходной и прокорродированных поверхностей образцов для определения локальных скоростей коррозии, полученные на лазерном сканирующем микроскопе LSM-Exciter, приведены на рисунке 4.

Таблица 2. Результаты контроля показателей стенда «Монитор-Стенд-А»

Дата	O ₂ , мг/л	pH	CO ₂ , мг/л	T, °C	Monicor, мм/год	Nanocorr, мм/год
01.11.16	0,088	6,3	122,9446	20,1	0,3636	0,2315
02.11.16	0,070	5,4	129,1843	20,1	1,1274	0,1432
03.11.16	0,051	5,4	129,0943	20,1	1,2636	0,0451
04.11.16	0,054	5,9	127,7448	20,1	0,6800	0,0286
05.11.16	0,060	6,2	131,8628	20,1	0,5000	0,0196
06.11.16	0,073	6,2	134,1023	20,1	0,5000	0,0183
07.11.16	0,084	6,2	127,2981	20,1	0,5005	0,0179
08.11.16	0,065	6,3	125,4434	20,1	0,4994	0,0148
09.11.16	0,064	6,4	120,0430	20,1	0,4948	0,0115
10.11.16	0,061	6,4	116,2274	20,0	0,4985	0,0056
11.11.16	0,062	6,4	119,7800	20,1	0,5004	0,0044
12.11.16	0,080	6,4	118,4164	20,1	0,5008	0,0041
13.11.16	0,108	6,4	120,0474	20,1	0,4992	0,0040
14.11.16	0,089	6,4	122,2679	20,0	0,4983	0,0025
15.11.16	0,068	6,5	125,0021	20,1	0,4974	0,0025
16.11.16	0,173	6,5	129,7476	20,1	0,5022	0,0038
17.11.16	0,305	6,5	128,9582	20,1	0,5134	0,0077
18.11.16	0,444	6,4	129,8004	20,0	0,5825	0,0127
19.11.16	0,628	6,4	129,2229	20,1	0,5977	0,0219
20.11.16	0,973	6,3	134,0180	20,1	0,5971	0,0467
21.11.16	1,121	6,3	125,3440	20,1	0,5860	0,0612
22.11.16	0,064	6,3	115,6871	20,0	0,5370	0,0054
23.11.16	0,058	6,3	120,6465	20,0	0,5804	0,0052
24.11.16	0,063	6,3	120,6936	20,0	0,5990	0,0023
Среднее значение	0,20	6,25	125,15	20,08	0,58	0,03

Таблица 3. Результаты определения скорости коррозии гравиметрическим методом стали 13ХФА

Начальная масса, г	Конечная масса, г	Потеря массы	Скорость коррозии, мм/год	Средняя скорость коррозии, мм/год	Макс. скорость коррозии, мм/год	Фотографии
6,2190	6,0475	0,1715	0,38	0,38	0,40
6,2827	6,1025	0,1802	0,40
6,2727	6,1083	0,1644	0,37

Рисунок 3. Графики основных контролируемых показателей эксперимента

а) исходная поверхность по оси X (вдоль линий шлифовки)

б) прокорродированная поверхность образца по оси X

Рисунок 4. Профилограммы, полученные на лазерном сканирующем микроскопе LSM-Exciter, исходной (а) и прокорродированных (б) поверхностей образцов при 50-кратном увеличении

Результаты обработки профилограмм образцов-свидетелей представлены в таблице 4. Как видно из таблицы 4, в процессе эксперимента шероховатость поверхности уменьшилась примерно в 4 раза, т.е. локальной коррозии в данном случае практически и не было, что в принципе соответствует полученным по методу CMAS результаты - сред-

няя скорость локальной коррозии за весь эксперимент составила 0,03 мм/год, что соответствует глубине язв $0.03/365 \cdot 24 = 0,002$ мм (2 мкм).

Анализ поверхности образца при 100-кратном увеличении позволил найти наиболее глубокие язвы, их фотографии и профилограммы показаны на рисунке 5.

Рисунок 5. Наиболее глубокие язвы на образце при 100-кратном увеличении

Таблица 4. Результаты обработки профилограмм образцов-свидетелей

Параметры	Исходная поверхность, мкм			Прокор- родированная поверхность, мкм
	по X	по Y	вдоль линий шлифовки	
Шероховатость R_a^*	8,7	7,5	5,8	1,9
Максимальная высота профиля R_{max}	30,4	40,2	28,5	7,6
Примечание. * R_a характеризует среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины, можно принять, что средняя глубина впадин, измеренная от вершин, равна удвоенной R_a .				

В проведенном эксперименте средняя скорость коррозии по потере массы образцов (0,38 мм/год) была достаточно близка скорости коррозии, полученной по методу LPR (0,58 мм/год). С учетом того, что сталь 13ХФА является более коррозионностойкой, чем сталь 20, из которой сделаны электроды для датчика LPR (по разным источникам ее стойкость при углекислотной коррозии выше на 20-50 %, чем у стали 20), данный результат можно считать хорошей сходимостью с фактическими данными для электронного метода контроля LPR.

Вывод

Как видно из полученных экспериментальных данных и анализа метода измерений, метод LPR достаточно достоверно отражает показатели общей коррозии образца, метод CMAS близко характеризует среднюю

локальную скорость коррозии (не учитывая при этом скорость общей коррозии), но не дает представления о максимальной локальной скорости коррозии. Соответственно, применение метода CMAS для оперативного контроля рекомендуется в комплексе с методом LPR, позволяющим судить о скорости общей коррозии.

Сам подход, реализованный в методе CMAS, особенно в тех случаях, в которых существует опасность сильной локализации коррозии, должен оказаться полезным, поскольку других методов, которые бы позволяли прямыми измерениями определять скорость локальной коррозии, в настоящее время не существует, но применение этого метода должно сопровождаться анализом условий коррозии, некоторые из которых могут привести к высокой погрешности показаний.

Список литературы

1. Steinsmo U., Rone T., Drugli J.M. Aspects of Testing and Selecting Stainless Steels for Sea Water Applications // CORROSION/94, paper No. 492. Houston, TX: NACE, 1994.
2. Fei Z., Kelly R.G., Hudson J.L. Spatiotemporal Patterns on Electrode Arrays // Journal of Physical Chemistry. 1996. No. 100 (49). P. 18986-18991.
3. Tan Y.J. Wire Beam Electrode: a New Tool for Studying Localized Corrosion and Other Heteroge-

References

1. Steinsmo U., Rone T., Drugli J.M. Aspects of Testing and Selecting Stainless Steels for Sea Water Applications. CORROSION/94, paper No. 492, Houston, TX, NACE, 1994.
2. Fei Z., Kelly R.G., Hudson J.L. Spatiotemporal Patterns on Electrode Arrays. Journal of Physical Chemistry, 1996, No. 100 (49), pp. 18986-18991.
3. Tan Y.J. Wire Beam Electrode: a New Tool for Studying Localized Corrosion and Other Heteroge-

neous Electrochemical Processes // *Corrosion Science*. 1999. No. 1 (2). P. 229-247.

4. Tan Y.J., Liu T., Aung N. Localized Corrosion and Inhibition Studies Using the Wire Beam Electrode Method in Conjunction with the Electrochemical Noise Analysis and the Scanning Reference Electrode Technique // *CORROSION/2004*, paper No. 04427. Houston, TX: NACE, 2004.

5. Budiansky N.D., Hudson J.L., Scully J.R. Origins of Persistent Interaction among Localized Corrosion Sites on Stainless Steel // *Journal of the Electrochemical Society*. 2004. No. 151 (4). P. B233-B243.

6. Cong H., Budiansky N.D., Scully J.R., Michels H.T. Use of Coupled Electrode Arrays to Elucidate Copper Pitting as a Function of Potable Water Chemistry // *CORROSION/07*, paper No. 07392. Houston, TX: NACE, 2007.

7. Wall F.D., Martinez M.A. A Statistics-Based Approach to Studying Aluminum Pit Initiation Intrinsic and Defect-Driven Pit Initiation Phenomena // *Journal of the Electrochemical Society*. 2003. No. 150 (4). P. B146-B157.

8. Yang L., Sridhar N. Monitoring of Localized Corrosion // *ASM Handbook*. Vol. 13A Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection / Stephen D. Crammer, Bernard S. Covino, Jr., eds. Materials Park, OH: ASM, 2003. P. 519-524.

9. Yang L., Sridhar N. Coupled Multielectrode Online Corrosion Sensor // *Materials Performance*. 2003. No. 42 (9). P. 48-52.

10. Yang L., Sridhar N., Pensado O., Dunn D.S. An In-Situ Galvanically Coupled Multi Electrode Array Sensor for Localized Corrosion // *Corrosion*. 2002. No. 58. P. 10042.

11. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.

12. Мальцева Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000.

13. Тукаев Р.Ф., Демченко М.В., Сисанбаев А.В. Коррозионный рельеф поверхности сварных швов, полученных электродуговой и лазерной сваркой // *Химическая физика и мезоскопия*. 2015. Т. 17. № 3. С. 403-407.

14. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали лазерным сканирующим методом // *Химическая физика и мезоскопия*. 2012. Т. 14. № 4. С. 569-573.

15. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Исследование взаимосвязи деформационного рельефа и степени поврежденности стали // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. № 2. С. 42-44.

16. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Методика исследования фрактальной размерности деформационной по-

neous Electrochemical Processes. *Corrosion Science*, 1999, No. 1 (2), pp. 229-247.

4. Tan Y.J., Liu T., Aung N. Localized Corrosion and Inhibition Studies Using the Wire Beam Electrode Method in Conjunction with the Electrochemical Noise Analysis and the Scanning Reference Electrode Technique. *CORROSION/2004*, paper No. 04427, Houston, TX, NACE, 2004.

5. Budiansky N.D., Hudson J.L., Scully J.R. Origins of Persistent Interaction among Localized Corrosion Sites on Stainless Steel. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, No. 151 (4), pp. B233-B243.

6. Cong H., Budiansky N.D., Scully J.R., Michels H.T. Use of Coupled Electrode Arrays to Elucidate Copper Pitting as a Function of Potable Water Chemistry. *CORROSION/07*, paper No. 07392, Houston, TX, NACE, 2007.

7. Wall F.D., Martinez M.A. A Statistics-Based Approach to Studying Aluminum Pit Initiation Intrinsic and Defect-Driven Pit Initiation Phenomena. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, No. 150 (4), P. B146-B157.

8. Yang L., Sridhar N. Monitoring of Localized Corrosion. *ASM Handbook*. Vol. 13A Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection / Stephen D. Crammer, Bernard S. Covino, Jr., eds. Materials Park, OH, ASM, 2003, pp. 519-524.

9. Yang L., Sridhar N. Coupled Multi Electrode Online Corrosion Sensor. *Materials Performance*, 2003, No. 42 (9), pp. 48-52.

10. Yang L., Sridhar N., Pensado O., Dunn D.S. An In-Situ Galvanically Coupled Multi Electrode Array Sensor for Localized Corrosion. *Corrosion*, 2002, No. 58, pp. 10042.

11. Zhuk N.P. *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [Course in the Theory of Corrosion and Metals Protection]. Moscow, Metallurgiya, 1976. 472 p. (in Russ.).

12. Mal'tseva G.N. *Korroziya i zashchita oborudovaniya ot korrozii*: ucheb. posobie. [Corrosion and Equipment Protection against Corrosion]. Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000. (in Russ.).

13. Tukaev R.F., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V. Korroziyonnyi rel'ef poverkhnosti svarnykh shvov, poluchennykh elektrodugovoi i lazernoi svarkoi [Corrosive Relief of Surface for Arc and Laser Beam Welds]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya - Chemical Physics and Mesoscopy*, 2015, T. 17, No. 3, pp. 403-407. (in Russ.).

14. Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Issledovaniya fraktal'noi razmernosti deformatsionnoi poverkhnosti stali lazernym skaniruyushchim metodom [Research Fractal Dimension Deformation Steel Surface by Laser Scanning Methods]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya - Chemical Physics and Mesoscopy*, 2012, T. 14, No. 4, pp. 569-573. (in Russ.).

15. Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. Issledovanie vzaimosvyazi deformatsionnogo rel'efa i

верхности стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 7-1. С. 42-44.

17. Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Методика оценки степени поврежденности сварных соединений в стали ВСтЗсп5 по изменению деформационного рельефа поверхности // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. С. 63-66.

stepeni povrezhdennosti stali [Study of Correlation Between the Strain Relief and the Degree of Steel Damage]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2013, T. 79, No. 2, pp. 42-44. (in Russ.).

16. Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Metodika issledovaniya fraktal'noi razmernosti deformatsionnoi poverkhnosti stali. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2013, T. 79, No. 7-1, pp. 42-44. (in Russ.).

17. Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Metodika otsenki stepeni povrezhdennosti svarnykh soedinenii v stali VSt3sp5 po izmeneniyu deformatsionnogo rel'efa poverkhnosti [Method for Assessing the Damage Degree to Welded Joints in Steel VSt3sp5 on Changing the Deformation Surface Relief]. *Ekspertiza promyshlennoi bezopasnosti i diagnostika opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov - Industrial Safety Examination and Diagnostics of Hazardous Production Facilities*, 2015, pp. 63-66. (in Russ.).

Авторы

• Фаритов Айрат Табрисович, канд. техн. наук
Государственное автономное научное учреждение «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан»
Центр нефтегазовых технологий и новых материалов
Заведующий лабораторией «Надежность трубопроводного транспорта газожижкостных смесей»
Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15
e-mail: atf@monicor.ru

The Authors

• Faritov Ayrat T., Candidate of Technical Sciences
Institute of Strategic Researches of Republic of Bashkortostan, State Autonomous Scientific Department
Center of Oil and Gas Technologies and New Materials
Head of Reliability for Pipeline Transport of Gas-Liquid Mixtures Laboratory
15, Kirova str., Ufa, 450008, Russian Federation
e-mail: atf@monicor.ru

• Чепайкин Даниил Алексеевич
ООО Научно-производственная фирма «Акрус-М»
Отдел разработки электронного оборудования
Начальник
Российская Федерация, 450001, г. Уфа, ул. Пархоменко, 155, корпус 1, этаж 2
тел. (347) 287-17-27 +070
e-mail: cda@monicor.ru

• Chepaykin Daniil A.
Research and Production Firm «Akrus-M» Ltd
Development of Electronic Equipment Department
Head
Floor 2, 155/1, Parkhomenko str., Ufa, 450001, Russian Federation
tel: (347) 287-17-27 +070
e-mail: cda@monicor.ru

• Сазонов Антон Александрович
ООО Научно-производственная фирма «Акрус-М»
Отдел разработки электронного оборудования
Инженер-программист 2-й категории
Российская Федерация, 450001, г. Уфа, ул. Пархоменко, 155, корпус 1, этаж 2
тел. (347) 287-17-27 +070
e-mail: saa@monicor.ru

• Sazonov Anton A.
Research and Production Firm «Akrus-M» Ltd
Development of Electronic Equipment Department
Software Engineer 2nd Category
Floor 2, 155/1, Parkhomenko str., Ufa, 450001, Russian Federation
tel: (347) 287-17-27 +070
e-mail: saa@monicor.ru

• Сисанбаев Альберт Васильевич, канд. физ.-мат. наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН»
Старший научный сотрудник лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии»,
Руководитель подразделения «Оптическая и лазерная микроскопия»
Российская Федерация, 450001, г. Уфа,
ул. Степана Халтурина, 39
e-mail: sisan-av@yandex.ru

• Sisanbaev Albert V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Institute of Problems of Metal Superplasticity of Russian Academy of Sciences, Federal State-Budgetary Institution of Science
Senior Researcher of Nanomaterials and Nanotechnologies Laboratory
Head of Optical and Laser Microscopy Department
39, S. Khalturina str., Ufa, 450001, Russian Federation
e-mail: sisan-av@yandex.ru

• Мурзагулов Григорий Сергеевич, канд. биол. наук
Государственное автономное научное учреждение «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан»
Центр нефтегазовых технологий и новых материалов
Научный сотрудник лаборатории «Надежность трубопроводного транспорта газожидкостных смесей»
Российская Федерация, 450008, г. Уфа,
ул. Кирова, 15
e-mail: mgs@monikor.ru

• Murzagulov Grigoriy S., Candidate of Biological Sciences
Institute of Strategic Researches of Republic of Bashkortostan, State Autonomous Scientific Department
Center of Oil and Gas Technologies and New Materials
Researcher of Reliability for Pipeline Transport of Gas-Liquid Mixtures Laboratory
15, Kirova str., Ufa, 450008, Russian Federation
e-mail: mgs@monikor.ru