

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ. ЧАСТЬ 1. СПЕКТРАЛЬНО – ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ ПОТЕНЦИАЛА

С.С. Виноградова

Светлана Станиславовна Виноградова (ORCID 0000-0003-2621-5184)*

Кафедра технологии электрохимических производств, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

E-mail: vsvet2000@mail.ru*

Исследовано распространение локализованной коррозии нержавеющей сталей путем спектрально частотного анализа (СЧА) колебаний потенциала в режимах стационарной и циклической гальваностатической поляризации. Объектами исследования служили коррозионностойкие аустенитные и аустенитно-ферритные хромоникелевые стали: 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х22Н6Т, обладающие стойкостью к питтинговой коррозии, в водном растворе 0,1 М NaCl с цианидсодержащим комплексообразователем, стимулятором коррозии - 0,01 г/л ($K_3[Fe(CN)_6]$). Исследования проводили в диапазоне малых плотностей тока (0,5–10 мкА/см²) из-за малых значений предельной диффузионной плотности тока по кислороду. Для нахождения времени зарождения макропиттингов предложено использовать СЧА хронопотенциограмм с их последующей статистической обработкой (преобразование Фурье). В режиме стационарной гальваностатической поляризации исследовались частотные характеристики в диапазоне 1,0±0,5 мкА/см². При анализе графиков спектральной плотности установлено, что доминирующая частота характеризует время формирования макропиттинга, а участки хронопотенциограммы следует делить на участки продолжительностью не более 50-100 с. В нестационарных условиях гальваностатической поляризации в диапазоне 1,0-10 мкА/см² в циклическом режиме установили, что процессы зарождения и пассивации макропиттингов прослеживаются при изменяющемся значении поляризующего тока. На основании СЧА хронопотенциограмм установлено, что среднее время жизни макропиттинга составляет 250-300 с (диапазон частот 0,033 - 0,004 Гц). Определены доминирующие частоты для выявления характерных зависимостей огибающих по верхней (f_{ω}) и нижней (f_{ω}) границам изменения потенциала, на их основе предложен алгоритм выбора значений параметров режима прогнозирования процессов образования макропиттингов.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, питтинговая коррозия, макропиттинг, спектрально частотный анализ, гальваностатическая поляризация, прогнозирование

PREDICTION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES OF LOCAL DISSOLUTION OF STAINLESS STEELS. PART 1. SPECTRAL –FREQUENCY ANALYSIS OF POTENTIAL FLUCTUATIONS

S.S. Vinogradova

Svetlana S. Vinogradova (ORCID 0000-0003-2621-5184)*

Department of Electrochemical Technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, 420015, Russia

Email: vsvet2000@mail.ru*

The propagation of localized corrosion of stainless steels was investigated by spectral frequency analysis (HPA) of potential fluctuations in the modes of stationary and cyclic galvanostatic polarization. Corrosion-resistant austenitic and austenitic-ferritic chromium-nickel steels were

studied: 12X18N10T, 10X17N13M2T, 08X22N6T, resistant to pitting corrosion, in an aqueous solution of 0.1 M NaCl with a cyanide-containing complexing agent, a corrosion stimulator - 0.01 g/l ($K_3[Fe(CN)_6]$). The studies were carried out in the range of low densities ($0.5\text{--}10\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$) due to the small values of the limiting diffusion current density in oxygen. To find the time of the origin of macropittings, it is proposed to use the NAV of chronopotentiograms with their subsequent statistical processing (Fourier transform). It has been established that fluctuations in the boundary polarization regime are characteristic of the process of the origin, development and passivation of macropittings. In the mode of stationary galvanostatic polarization, frequency characteristics were studied in the range of $1.0 \pm 0.5\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$. When analyzing spectral density graphs, it was found that the dominant frequency characterizes the time of formation of the macropitting, and the sections of the chronopotentiogram should be divided into sections with a duration of no more than 50-100 s. In non-stationary conditions of galvanostatic polarization in the range of $1.0\text{--}10\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ in a cyclic mode, it was found that the processes of nucleation and passivation of macropittings can be traced with a changing value of the polarizing current. Based on the frequency range of chronopotentiograms, it was found that the average macropitting lifetime is 250-300 s (frequency range 0.033 - 0.004 Hz). The dominant frequencies are determined to identify the characteristic dependencies of the envelopes along the upper (f_{hg}) and lower (f_{hg}) boundaries of the potential change, based on them, an algorithm is proposed for selecting the values of the parameters of the prediction mode of the formation of macropitting processes.

Key words: stainless steel, pitting corrosion, micropitting, spectral frequency analysis, galvanostatic polarization, forecasting

Для цитирования:

Виноградова С.С. Прогнозирование электрохимических процессов локального растворения нержавеющей стали. Часть 1. Спектрально – частотный анализ флуктуаций потенциала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 3. С. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6944.

For citation:

Vinogradova S.S. Prediction of electrochemical processes of local dissolution of stainless steels. Part 1. Spectral –frequency analysis of potential fluctuations. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 3. P. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6944

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия считается критической проблемой во многих инженерных конструкциях и материалах [1, 2]. Нержавеющие стали – это сплавы на основе железа, содержащие не менее 11% хрома. Существование различных марок этого сплава делает его одним из самых разнообразных материалов с точки зрения состава, механических свойств и микроструктуры [3]. По этой причине нержавеющие стали находят широкое применение, начиная от транспорта и химической промышленности и заканчивая строительством [4]. Аустенитная нержавеющая сталь является одной из самых популярных марок нержавеющей стали благодаря своей превосходной коррозионной стойкости, высокой прочности при сохранении низких затрат на техническое обслуживание и способности к вторичной переработке [5]. Однако этот материал может подвергаться коррозии в агрессивных условиях, особенно в хлоридсодержащих средах и при высокой температуре [1]. Среди различных видов коррозии

питтинговая коррозия является одним из наиболее опасных видов коррозии металлических сплавов [6]. Этот тип локализованной коррозии возникает на микроскопическом уровне и приводит к необратимым нарушениям свойств материала [7]. Чтобы предотвратить внезапное разрушение и последующие нежелательные аварии в процессе эксплуатации, очень важно заранее спрогнозировать срок службы изделий из нержавеющей стали.

За последние десятилетия разработано много моделей прогнозирования питтинговой коррозии, основанных на различных подходах [8-10]. Прогнозирование стабильного роста питтингов, определяемого процессами переноса ионов в электролитических растворах с учетом закона сохранения массы для тела, имеющего границу раздела металл/ раствор, отделяющую твердый электрод от жидкого электролита, рассматривается в [11]. Функции математического решения (предсказания модели) связаны с ростом питтинга с точки зрения глубины и ширины, а также с эволюцией тока кор-

розии. Разработан метод извлечения ключевых кинетических параметров для проверки и калибровки двумерной конечно-элементной модели, ранее разработанной Лейкоком и Уайтом [12], в котором локальная плотность тока вдоль границы питтинга измеряется непосредственно по рентгенограммам. Прогнозирование количественного коррозионного риска, основанного на экспериментальных исследованиях коррозии, и количественные модели точечной коррозии для оценки риска точечной коррозии рассмотрены в [13]. Модель, способная прогнозировать состояние питтинговой коррозии стали 03X17H14M2 с учетом значения потенциала пробоя разработана в [14]. Способ обнаружения питтинговой коррозии без необходимости металлографического анализа поверхности материала, основанный на методах искусственного интеллекта: k-ближайших соседей (KNN) и искусственные нейронные сети (ANNS), представлен в [15]. Различные модели, основанные на искусственных нейронных сетях (ANNS), машинах опорных векторов (SVMS), дереве классификации (СТ) и k-ближайшем соседе (kNN), для разработки автоматического способа прогнозирования поведения нержавеющей стали при питтинговой коррозии в различных условиях окружающей среды рассматриваются в [16]. Простая детерминированная модель, которая учитывает влияние циклических напряжений в условиях точечной коррозии, рассмотрена в [17]. Метод решения на основе искусственной нейронной сети для моделирования стойкости нержавеющей стали AISI 316L к питтинговой коррозии при различных формах обработки поверхности представлен в [18]. В [19] разработаны статистические модели прогнозирования продолжительности жизни металлических конструкций в условиях питтинговой коррозии для нержавеющих сталей с различным содержанием азота. Новый тип механизма обнаружения коррозии, с применением кругового пьезоэлектрического металлического преобразователя с измерением электромеханического импеданса, в котором пиковые частоты в сигнатурах проводимости линейно уменьшаются с увеличением потери толщины, вызванной коррозией предложен в [20].

В последнее время возрос интерес к использованию электрохимического анализа шума для исследования локализованной коррозии нержавеющей стали [21,22]. Существует два метода для измерения уровня шума, одним из методов является измерение флуктуаций тока под гальваностатическим контролем [23], а другим - измерение поляризации потенциостатических колебания без внешней поляризации [24].

В работе исследовалось инициирование и распространение локализованной коррозии нержавеющих сталей путем спектрального анализа колебаний потенциала в режимах стационарной и циклической гальваностатической поляризации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе изучались коррозионно-стойкие аустенитные и аустенитно-ферритные хромоникелевые стали: 12X18H10T, 10X17H13M2T, 08X22H6T, обладающие стойкостью к питтинговой коррозии. Использовали водный раствор 0,1 М NaCl, в который вводили цианидсодержащий комплексобразователь, стимулятор коррозии - 0,01 г/л ($K_3[Fe(CN)_6]$). Условия испытаний – без перемешивания, температура 21 °С, давление 101,32 кПа, влажность 40-60%. Экспериментальная установка - электрохимическая трехэлектродная ячейка ЯСЭ-2, рабочий электрод, хлоридсеребряный электрод сравнения, платиновый вспомогательный электрод, потенциостат - гальваностат «Р-30I». Режимы поляризации – гальваностатический (плотность тока 0,5-1,5 мкА/см²), циклический гальваностатический (поляризация 10-50 с, пауза 10-100 с, плотность тока 1-10 мкА/см²). Шероховатость образца после модификации поверхности измеряли с помощью лазерного сканирующего цифрового микроскопа Olympus LEXT OLS4100.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для количественного описания процесса питтинговой коррозии при прогнозировании коррозионного состояния предложена новая эквивалентная модель поверхностных дефектов с использованием понятия “макропиттинг”, который является сложной формой развития питтинговой коррозии из-за неравномерного роста основного и вторичных питтингов [25]. Изменяющаяся геометрическая форма локальной корродированной поверхности является важной причиной, вызывающей концентрацию напряжений в стальной конструкции. Для нахождения времени зарождения макропиттингов предложено использовать спектрально-частотный анализ (СЧА) хронопотенциограмм при различных условиях поляризации с последующей статистической обработкой (преобразование Фурье) значений потенциалов [26].

Гальваностатический метод поляризации выбран для исследований как наиболее информативный. Исследования проводили в диапазоне малых плотностей тока (0,5-10 мкА/см²) из-за малых значений предельной диффузионной плотности тока по кислороду (15-30 мкА/см²). Эксперимент

проводили в нестационарных (циклических) и стационарных условиях поляризации.

В режиме стационарной гальваностатической поляризации исследовали влияние плотности тока на области развития макропиттингов. Согласно литературным данным, плотность тока 1 мкА/см² приводит к переходу из пассивного в автоколебательный режим растворения [27]. Как показали исследования, увеличение времени поляризации при данной плотности тока переводит поверхность в пограничный режим растворения, при котором низкочастотные флуктуации связаны с формированием макропиттингов, поэтому проводили исследования частотных характеристик в диапазоне

1,0±0,5 мкА/см². Анализ хронопотенциограмм выявил три варианта флуктуаций потенциала: резкий спад и медленное нарастание, медленный спад и быстрое нарастание, медленный спад и медленное нарастание потенциала. Спад потенциала связан с преобладанием влияния процесса увеличения площади поверхности макропиттинга над ростом сопротивления электролита. Рост потенциала связан с увеличением сопротивления резистивного слоя и процессами активации поверхности внутри макропиттинга. Спектральную плотность мощности рассчитывали по значениям огибающей временных зависимостей потенциалов на хронопотенциограммах (рис. 1а).

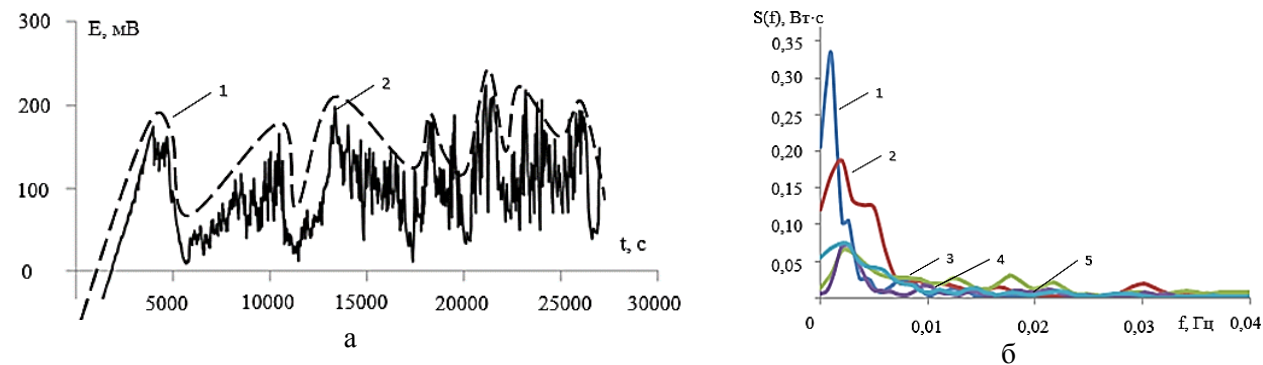


Рис. 1. Сталь 12Х18Н10Т: а) гальваностатический режим при плотности тока 0,5 мкА/см²: 1 – огибающая линия, 2 – хронопотенциограмма, б) спектральная плотность мощности при разной плотности тока (мкА/см²): 1- 0,5; 2 – 0,7; 3 – 1,0; 4 -1,25; 5 – 1,5
Fig. 1. Steel 12Х18Н10Т: а) galvanostatic mode at a current density of 0.5 μА/см²: 1 – envelope line, 2 - chronopotentiogram, б) spectral power density at different current density (μА/см²): 1- 0.5; 2 – 0.7; 3 – 1.0; 4 -1.25; 5 – 1.5

Доминирующие частоты определяли путем разложения хронопотенциограмм в ряд Фурье (шаг дискретизации 1 с), с применением пакета «Statistica» (рис. 1б). Значения доминирующих частот спектральной плотности мощности (f, Гц) увеличиваются с увеличением плотности тока для сталей 10Х17Н13М2 и 08Х22Н6Т (табл. 1), для стали 12Х18Н10Т при плотности тока 1,5 мкА/см² наблюдали снижение значения доминирующей частоты, что связано с переходом в режим локально – активного растворения.

Таблица 1
Доминирующие частоты, Гц спектральной плотности мощности исследуемых сталей
Table 1. Dominant frequencies, Hz of the spectral power density of the studied steels

Сталь	Плотность тока, мкА/см ²			
	0,5	0,7	1	1,5
12Х18Н10Т	0,002	0,0021	0,0023	0,0020
10Х17Н13М2Т	0,0025	0,0035	0,0042	0,0065
08Х22Н6Т	0,0044	0,0056	0,0062	0,0071

Провели исследование влияния разбиения участков хронопотенциограмм для определения значений доминирующих частот, соответствующих процессу зарождения – пассивации макропиттингов. При анализе графиков спектральной плотности установлено, что доминирующая частота характеризует время формирования макропиттинга. Графики хронопотенциограмм следует делить на участки продолжительностью 50-100 с, поскольку анализ излишне продолжительных участков хронопотенциограмм приводит к маскировке частот, соответствующих процессу динамического равновесия процессов зарождения – пассивации макропиттингов. Это равновесие согласно теории сложных систем предполагает стохастичность питтинга на поверхности, что позволяет описывать поведение электрохимической системы вероятностными законами. При этом поведение макропиттинга представляет собой осциллирующий процесс, который можно описывать как низкоразмерный хаос.

В нестационарных условиях поляризации в циклическом режиме установлено, что процессы

зарождения и пассивации макропиттингов прослеживаются при изменяющемся значении поляризующего тока. Режим нестационарной поляризации позволил проследить переходы поверхности металла из пассивного состояния в переходный режим растворения. В катодный полупериод происходила пассивация питтингов, а в анодный – появляются новые питтинги, о чем свидетельствует резкий спад потенциала анодного полупериода. Увеличение потенциала во времени свидетельствует о совершенствовании поверхности за счет пассивации вновь образованных питтингов.

Анализ хронопотенциограмм в режиме нестационарной поляризации в зависимости от плотности тока (j), продолжительности импульса ($\tau_{им}$) и паузы ($\tau_{п}$) позволил отследить состояние поверхности в момент отключения тока – при пассивном состоянии потенциал снижается постепенно (рис. 2а); в переходном состоянии наблюдали флуктуации на ниспадающей ветви потенциала после включения поляризации, что можно объяснить кинетическими или диффузионными затруднениями (рис. 2б). В момент выключения поляризации в переходном состоянии наблюдали облагораживание потенциала, что свидетельствует о способности макропиттинга к повторной пассивации.

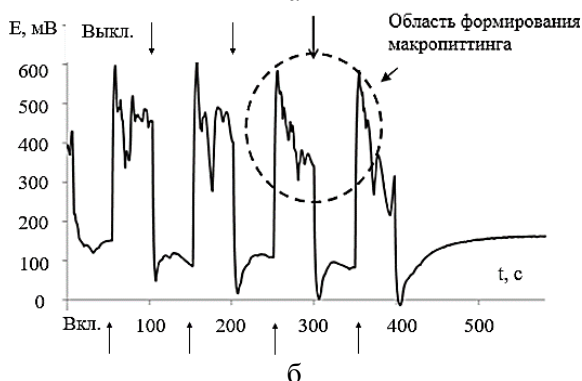
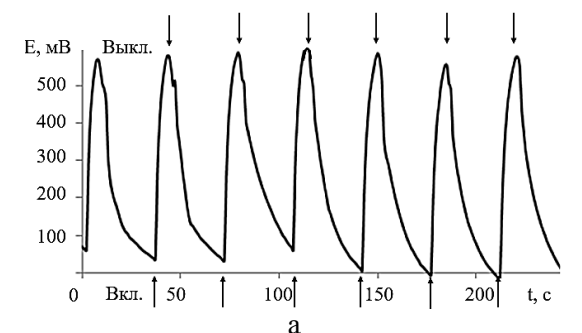


Рис. 2. Режим нестационарной поляризации на стали 12X18H10T в 0,1М NaCl 0,01г/л $K_3[Fe(CN)_6]$: а) $j = 1 \text{ мА/см}^2$, $\tau_{им} = 10 \text{ с}$, $\tau_{п} = 25 \text{ с}$; б) $j = 5 \text{ мА/см}^2$, $\tau_{им} = 50 \text{ с}$, $\tau_{п} = 50 \text{ с}$
Fig. 2. The mode of non-stationary polarization on steel 12X18H10T in 0.1M NaCl 0.01g/l $K_3[Fe(CN)_6]$: а) $j = 1 \text{ мА/см}^2$, $\tau_{им} = 10 \text{ с}$, $\tau_{п} = 25 \text{ с}$; б) $j = 5 \text{ мА/см}^2$, $\tau_{им} = 50 \text{ с}$, $\tau_{п} = 50 \text{ с}$

На основании спектрального анализа хронопотенциограмм установлено, что среднее время жизни макропиттинга составляет 250-300 с (диапазон частот 0,033 - 0,004 Гц). Поэтому провели исследования в режиме: $j = 1-10 \text{ мА/см}^2$, $\tau_{им} = 300 \text{ с}$, $\tau_{п} = 300 \text{ с}$. При плотности тока 1 мА/см^2 поверхность 12X18H10T находится в пассивном состоянии и макропиттинги отсутствуют на поверхности, при 5 мА/см^2 – в пограничном режиме, где доминируют макропиттинги, при 10 мА/см^2 – в режиме активного растворения. В табл. 2 представлены режимы локального растворения для исследуемых сталей в зависимости от плотности тока.

Таблица 2
Режимы локального растворения исследуемых сталей
Table 2. Modes of local dissolution of the studied steels

Исследуемые стали	Класс сталей	j , мА/см ²		
		1	5	10
12X18H10T	Аустенитная коррозионностойкая	А	П	Л-А
08X22H6T	Аустенитно-ферритная коррозионностойкая	А	П	Л-А
10X17H13M2T	Аустенитная коррозионностойкая жаропрочная высоколегированная	А	А	П

Примечание: А – автоколебательный режим, П – пограничный режим, Л-А – локально - активное растворение
Note: A – self-oscillatory mode, П – boundary mode, Л-А – locally active dissolution

Пограничный режим растворения является областью существования макропиттингов, поэтому для целей прогнозирования целесообразно использовать плотность тока, которая переводит исследуемую сталь в данный режим. Так, для 12X18H10T и 08X22H6T плотность тока, позволяющая смоделировать процессы зарождения, развития и пассивации макропиттингов, составляет 5 мА/см^2 .

Влияние длительностей импульса и паузы при нестационарной поляризации также исследованы. Паузы в 5-50 с оказалось недостаточно для пассивации поверхности, т.к. в периоде импульса происходило формирование новых питтингов, это сказывалось на уменьшении потенциала формирования питтингов от цикла к циклу. При паузе 10-50 с наблюдали модуляции по верхней границе изменения потенциала: 12X18H10T и 08X22H6T ($\tau_{п} = 10-25 \text{ с}$), 10X17H13M2T ($\tau_{п} = 25-50 \text{ с}$). Увеличение времени паузы до 100 с вызвало полную пассивацию поверхности на всех исследуемых сталях. Это можно объяснить наличием легирующих элементов в составе сплавов: хром создает на поверхности

стального изделия пленку – защиту от неблагоприятных и вредных воздействий; молибден способствует повышению жаростойкости стали и увеличивает срок службы изделия.

Проведен спектральный анализ хронопотенциограмм исследуемых сталей в различных режимах нестационарной поляризации и определены доминирующие частоты для выявления характерных зависимостей огибающих по верхней ($f_{вг}$) и нижней ($f_{нг}$) границам изменения потенциала. Верхние границы – потенциал образования питтингов при включении тока, нижние границы – потенциал при выключении тока (табл. 3).

Таблица 3

Результаты спектрального анализа исследуемых сталей

Table 3. The results of spectral analysis of the studied steels

Сталь	$\tau_{им}, c$	$\tau_{п}, c$	$f_{вг}, Гц$	$f_{нг}, Гц$
08X22H6T	10	10	0,0009	0,0010
		10	0,0012	0,0017
	25	25	область локального растворения	
		50		
		100		
	50	10	0,0009	0,00087
		25	0,0013	0,0014
		50	область пассивации	
		100		
12X18H10T	10	25	0,006	0,005
		10	0,0065	0,0047
	25	25	0,008	0,009
		50	0,001	-
		100	область пассивации	
	50	10	область локального растворения	
		15		
		25	0,0022	-
		50	область пассивации	
		100		
10X17H13M2T	10	10	0,0006	0,0007
		10	область локального растворения	
	25	25		
		50		
		100	область пассивации	
	50	10	0,0006	0,0008
		25	область пассивации	
		50		
		100		

Анализ значений доминирующих частот показал, что, например, для стали 12X18H10T режим модуляций потенциала, соответствующий процессу зарождения и развития макропиттингов, наблюдали при $\tau_{им} = 10-25$ с и $\tau_{п} = 10-50$ с; режим локального растворения наблюдали при $\tau_{им} = 50$ с

и $\tau_{п} = 10-15$ с; режим пассивации макропиттингов при $\tau_{им} = 50$ с и $\tau_{п} = 50-100$ с.

На основе СЧА по верхним и нижним границам изменения потенциала предложен алгоритм выбора значений плотности тока нестационарной поляризации с учетом времени жизни макропиттинга. В диапазоне 1 – 10 мкА/см² устанавливается плотность тока, при которой наблюдается пограничный режим растворения. При этой плотности тока на основании анализа хронопотенциограмм определяются длительности $\tau_{им}$ и $\tau_{п}$.

ВЫВОДЫ

Предложены алгоритмы выбора значений параметров режима на основе мониторинга динамики питтинговой коррозии для целей прогнозирования процессов образования макропиттинга в режимах стационарной и нестационарной гальваностатической поляризации.

В режиме стационарной поляризации для определения доминирующих частот времени формирования макропиттингов предложено делить график потенциограммы на участки продолжительностью 50-100 с.

В режиме нестационарной поляризации определены доминирующие частоты для выявления характерных зависимостей огибающих по верхней и нижней границам изменения потенциала и предложен алгоритм выбора значений плотности тока нестационарной поляризации с учетом времени жизни макропиттинга:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The author declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Kappes M.A. Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review. *Corros. Rev.* 2020. V. 38. N 1. P. 1-24.
2. Нгуен Ван Чи, Као Ньят Линь, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Нонг Куок Куанг, Зяблов А.Н. Исследование коррозии конструкционной стали АН-36 в морской среде Вьетнама. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 139-144. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6496.
Nguyen Van Chi, Cao Nhat Linh, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Nong Quoc Quang, Zyablov A.N. Investigation of corrosion of structural steel A N-36 in the marine environment of Vietnam. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 139-144 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6496.
3. Gupta R.K., Birbilis N. The influence of nanocrystalline structure and processing route on corrosion of stainless steel: A review. *Corros. Sci.* 2015. V. 92. P. 1-15.

4. **Zaffora A., Di Franco F., Santamaria M.** Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry. *Curr. Opin. Electrochem.* 2021. V. 29. P. 100760.
5. **Sun Y.T.** Revisiting the effect of molybdenum on pitting resistance of stainless steels. *Tungsten.* 2021. V. 3. N 3. P. 329-337.
6. **Akpanyung K.V., Loto R.T.** Pitting corrosion evaluation: A review. *J. Phys.: Conf. Ser. – IOP Publ.* 2019. V. 1378. N 2. P. 022088.
7. **Salarvand A., Poursaiedi E., Azizpour A.** Probability Approach for Prediction of Pitting Corrosion Fatigue Life of Custom 450 Steel. *Int. J. Eng.* 2018. V. 31. N 10. P. 1773-1781.
8. **Zhao Y.** The development of a mechanistic-chemometrics model with multi-degree of freedom for pitting corrosion of HP-13Cr stainless steel under extremely oilfield environments. *Corros. Sci.* 2021. V. 181. P. 109237.
9. **Mollapour Y., Poursaiedi E.** Experimental and numerical analysis of Pitting Corrosion in CUSTOM 450 Stainless Steel. *Eng. Fail. Anal.* 2021. V. 128. P. 105589.
10. **Jafarzadeh S., Chen Z., Bobaru F.** Computational modeling of pitting corrosion. *Corros. rev.* 2019. V. 37. N 5. P. 419-439.
11. **Scheiner S., Hellmich C.** Stable pitting corrosion of stainless steel as diffusion-controlled dissolution process with a sharp moving electrode boundary. *Corros. Sci.* 2007. V. 49. N 2. P. 319-346.
12. **Ghahari S.M.** Pitting corrosion of stainless steel: measuring and modelling pit propagation in support of damage prediction for radioactive waste containers. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 2011. V. 46. N 2. P. 205-211.
13. **Pohjanne P.** A method to predict pitting corrosion of stainless steels in evaporative conditions. *J. Construct. Steel Res.* 2008. V. 64. N 11. P. 1325-1331.
14. **Jiménez-Come M.J., Turias Domínguez I.J., Matres V.** Prediction of pitting corrosion status of EN 1.4404 stainless steel by using a 2-stage procedure based on support vector machines. *J. Chemometrics.* 2017. P. 31. N 12. P. e2936.
15. **Jiménez-Come M.J.** Characterization of pitting corrosion of stainless steel using artificial neural networks. *Mater. Corros.* 2015. V. 66. N 10. P. 1084-1091.
16. **Sriraman M.R., Pidaparti R.M.** Crack initiation life of materials under combined pitting corrosion and cyclic loading. *J. Mater. Eng. Perform.* 2010. V. 19. P. 7-12.
17. **Jafari E., Jafari A., Hadianfard M.J.** Prediction of pitting corrosion of surface treated AISI 316L stainless steel by artificial neural network. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 2011. V. 46. N 7. P. 762-766.
18. **Dai J.** Revealing significant effect of nitrogen on prolonging pitting corrosion lifetime of martensitic stainless steel by modelling approach. *Corros. Sci.* 2022. V. 203. P. 110369.
19. **Luo W.** Pitting corrosion prediction based on electromechanical impedance and convolutional neural networks. *Struct. Health Monitoring.* 2023. V. 22. N 3. P. 1647-1664.
20. **Lv J.** The Application of Electrochemical Noise for the Study of Metal Corrosion and Organic Anticorrosion Coatings: A Review. *ChemElectroChem.* 2021. V. 8. N 2. P. 337-351.
21. **Klapper H.S.** Using electrochemical noise to elucidate the mechanisms involved in localized corrosion—a review. *Nace Corros.* 2018. P. NACE-2018-11236.
22. **Kashani F.R., Rezaei M.** Improving the localized corrosion resistance of 304 stainless steel in HCl solution by adsorption of molybdate ions: Interaction mechanisms at the interface using molecular dynamics simulation and electrochemical noise analysis. *Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. V. 647. P. 129085.
23. **Виноградова С.С., Тазиева Р.Ф., Ахметова А.Н.** Методика расчета модуля импеданса для коррозионного мониторинга состояния поверхности хромоникелевых сталей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 3. С. 60-66.
Vinogradova S.S., Tazieva R.F., Akhmetova A.N. Method of calculating the impedance modulus for corrosion monitoring of the surface condition of chromium-nickel steels. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2020. V. 63. N 3. P. 60-66 (in Russian).
24. **Wang C.** In situ monitoring of the localized corrosion of 304 stainless steel in FeCl₃ solution using a joint electrochemical noise and scanning reference electrode technique. *Electrochem. Commun.* 2018. V. 90. P. 11-15.
25. **Vinogradova S.S.** Engineering methodology for calculating the formation time of stable pitting of stainless steels taking into account the integral characteristic – «macropitting». *Butlerov Commun.* 2023. V. 5. N 1. DOI: 10.37952/ROI-jbc-B/23-5-1-7.
26. **Виноградова С.С., Ахметова А.Н.** Использование метода спектрального анализа электрических сигналов для оценки состояния поверхности хромоникелевых сталей в процессе коррозионного мониторинга. *Бутлеров. сообщ.* 2016. Т. 48. №. 10. С. 150-155.
Vinogradova S.S., Akhmetova A.N. Using the method of spectral analysis of electrical signals to assess the state of the surface of chromium-nickel steels in the process of corrosion monitoring. *Butlerov. Soobsh.* 2016. V. 48. N 10. P. 150-155 (in Russian).
27. **Томашов Н.Д., Маркова О.Н., Чернова Г.П.** Электрохимическое исследование питтинговой коррозии нержавеющей хромоникелевых сталей, модифицированных V, Si, Mo или Re. *Коррозия и защита металлов: Сб. науч. тр.* 1970. С. 110.
Tomashov N.D., Markova O.N., Chernova G.P. Electrochemical study of pitting corrosion of stainless chromium-nickel steels modified V, Si, Mo or Re. *Corrosion and protection of metals: A collection of scientific papers.* 1970. P.110-117 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.07.2023

Принята к опубликованию 25.10.2023

Received 21.07.2023

Accepted 25.10.2023