

КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, В КИСЛОЙ И ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДАХ

© И. В. Макарова¹, Д. С. Харитонов¹, И. Б. Добрыдень², А. А. Черник¹

¹ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

² KTH Royal Institute of Technology, Surface and Corrosion Science Division, Stockholm, Sweden

E-mail: antihovich.irina@gmail.com; antihovich.irina@belstu.by

Поступила в Редакцию 15 мая 2018 г.

Методами импедансной спектроскопии и хроновольтамперометрии, хронопотенциометрии, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии изучено коррозионное поведение и морфология никелевых покрытий, электроосажденных из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов при температуре 20–25°C в кислой и щелочной средах. Предложены модели, описывающие процессы коррозии никеля в растворах H₂SO₄ и NaOH. Установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью обладают никелевые покрытия, формирующиеся из изобутиратных электролитов.

Ключевые слова: никелирование, коррозия, электрохимическая импедансная спектроскопия, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.1134/S0044461818090062

Никелевые покрытия широко используются для улучшения декоративных и физико-механических свойств поверхности различных металлов [1–3]. Современные экологические стандарты обусловили необходимость разработки новых безопасных составов электролитов никелирования [4, 5]. Для внедрения в промышленное производство новых электролитов особое значение имеет коррозионная стойкость получаемых никелевых покрытий, однако число работ, посвященных изучению данного вопроса, невелико [4–11]. Достаточно хорошо изучены коррозионные свойства покрытий, полученных из стандартного электролита Уоттса [12–14]. Данные, приводимые в статьях различных авторов, свидетельствуют о том, что на коррозионную стойкость никеля значительное влияние оказывают размер зерна [14–17], микроструктура [18], морфология [19–21], которые определяются параметрами электролиза: плотностью тока [13, 22–24], pH и температурой электролита [20].

Исследование коррозионной стойкости особенно актуально для наноразмерных никелевых

покрытий [8, 13–15, 20, 23, 25], так как подобная структура позволяет придать материалу новые механические и химические свойства. Уменьшения размера зерна никеля добиваются введением в электролит различных органических добавок [26] или применением нестационарных режимов электролиза [27, 28]. Влияние размера кристалла на коррозионные свойства никеля неоднозначно и в большинстве случаев определяется составом электролита. Установлено [14, 20], что для покрытий, полученных из электролита Уоттса, увеличение коррозионной стойкости наблюдается при формировании текстуры (111) с размерами кристалла 20–40 нм, а для покрытий из сульфатного электролита [18] — с текстурой (200) и размером кристалла 30–56 нм. Менг и др. [17], напротив, установили, что покрытия с размером зерна 50 нм более стойки в среде NaCl (pH 8.4), чем покрытия с размером зерна 10 нм, что объясняется эффектом двойникования.

Для изучения коррозионной стойкости покрытий чаще всего используют 3.0–3.5%-ный (~0.5 моль·л⁻¹) раствор хлорида натрия [29], ко-

торый моделирует морскую среду [30]. Ранее [29] было изучено коррозионное поведение никелевых покрытий, полученных из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов при температуре 20–25°C, в растворе NaCl. Установлено, что коррозионный процесс протекает неравномерно, и при выдержке в растворе NaCl наблюдаются периодические процессы активации и пассивации поверхности. При этом наименьшей коррозионной стойкостью обладают покрытия, полученные из ацетатных электролитов, имеющие меньшую шероховатость, но большую дефектность поверхности.

В ряде случаев никелевые покрытия подвергаются воздействию кислот и щелочей. Однако исследованию коррозии никеля в этих условиях уделяется недостаточное внимание [31]. Установлено [15], что в среде NaOH коррозионная стойкость никелевого покрытия, полученного из электролита Уоттса, выше, чем в среде H₂SO₄. При этом в литературе отсутствуют сведения по исследованию коррозионной стойкости никелевых покрытий, полученных из низкотемпературных электролитов.

Целью работы явилось исследование коррозионной стойкости никелевых покрытий, полученных из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов при температуре 20–25°C, в среде H₂SO₄ и NaOH.

Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись никелевые покрытия (толщина 6–9 мкм), осажденные на медную подложку из низкотемпературных электролитов никелирования с содержанием ионов Ni²⁺ 1 моль·дм⁻³. Состав электролитов представлен в табл. 1. Необходимое значение pH электролитов контролировали с помощью pH-метра pH-150. Для приготовления растворов использовали реактивы марки х.ч. и дистиллированную воду.

Коррозионные исследования проводили в растворах 0.5 М H₂SO₄ и 2 М NaOH. Исследования электрохимических процессов на границе электрод–электролит осуществляли в потенциодинамическом режиме на потенциостате IPC-Pro M (Россия) в стеклянной трехэлектродной ячейке при скорости развертки потенциала 1 мВ·с⁻¹ в интервале потенциалов –0.3÷1.5 В

от стационарного потенциала в растворе NaOH и –0.3÷2.0 В в растворе H₂SO₄ с целью регистрации активной–пассивной–транспассивной областей на полученных кривых. Токи коррозии рассчитывали по пересечению прямолинейных тафелевских участков катодных и анодных кривых при поляризации более ±10 мВ. Спектры импеданса регистрировали с помощью потенциостата Autolab PGSTAT 302N (Methrom Autolab, Нидерланды) в диапазоне частот от 10 кГц до 0.1 Гц с амплитудой переменного напряжения 10 мВ. Снятие частотных спектров импеданса проводили через 10 мин выдержки образцов в исследуемом растворе при установившихся значениях стационарного потенциала. Обработку полученных данных проводили с использованием программ Nova 2.1 и ZView 3.2с. В качестве рабочего электрода в электрохимических исследованиях использовали медь с нанесенным никелевым покрытием, вспомогательный электрод — графитовый, электрод сравнения — насыщенный хлоридсеребряный. Значения потенциалов пересчитывали на шкалу стандартного водородного электрода. Все электрохимические исследования, представленные в работе, проводили не менее 3 раз.

Морфологию свежесажженных покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Nanoscope Multimode 8 Pico Force AFM (Bruker) в прерывисто-контактном режиме tapping mode с использованием кремниевого кантиливера «*n*-тип» с радиусом острия иглы в пределах 8 нм (HQ:NSC35, MikroMasch). После выдержки образцов в коррозионной среде в течение 1 сут морфологию поверхности изучали методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа JEOL JSM-5610 LV.

Среднюю арифметическую шероховатость R_a поверхности свежесажженных образцов определяли из полученных АСМ изображений.

Обсуждение результатов

Ранее [32–34] показано, что из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов при температуре 20–25°C образуется никелевое покрытие с размером зерна 16–26 нм псевдотекстуры [111], которую можно интерпретировать как ([211] + [110]) [35]. Следовательно, при условии

Таблица 1
Состав электролитов никелирования

Состав	Концентрация, моль·дм ⁻³ , электролита		
	ацетатного	тарtratного	изобутиратного
NiSO ₄ ·7H ₂ O	—	0.8	0.8
NiCl ₂ ·6H ₂ O	1.0	0.2	0.2
CH ₃ COONH ₄	0.2	—	—
NaKC ₄ H ₄ O ₆	—	0.1	—
(CH ₃) ₂ CHCOOH	—	—	0.2
pH	2.0–4.0	2.0–2.5	2.0–4.0
Температура, °C	20–25		

идентичности кристаллической текстуры наиболее значительное влияние на коррозионную стойкость будут оказывать морфология и микрошероховатость поверхности.

АСМ изображения никелевых покрытий, осажденных при температуре 20–25°C из ацетатных, тарtratных и изобутиратных электролитов, представлены на рис. 1.

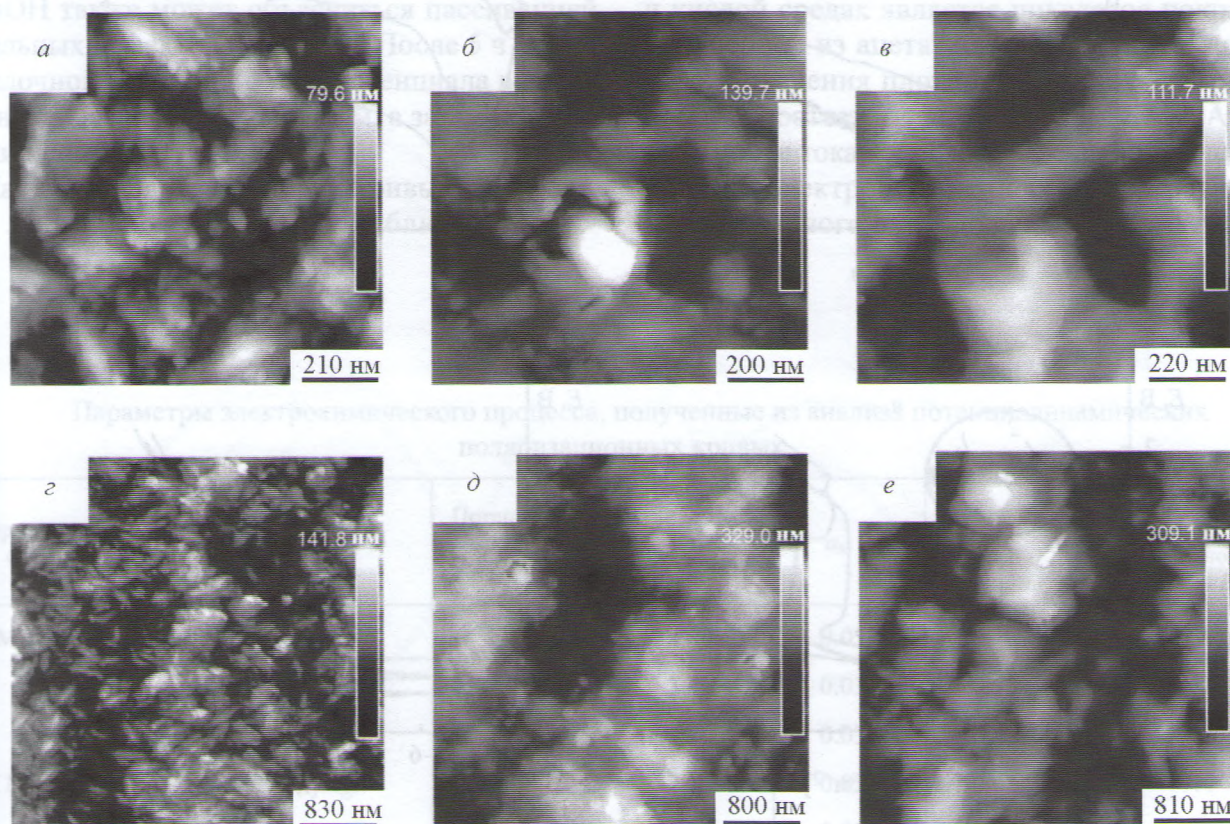


Рис. 1. АСМ изображения никелевых покрытий, полученных из ацетатных (а, г), тарtratных (б, д) и изобутиратных (в, е) электролитов.

Таблица 2
Средняя арифметическая шероховатость R_a никелевых покрытий, полученная из анализа АСМ изображений

Размер поверхности, мкм	Средняя арифметическая шероховатость поверхности R_a , нм, из электролита		
	ацетатного	тарtratного	изобутиратного
20×20	151.0	147.0	150.0
4×4	16.1	38.7	35.4
0.8×0.8 [29]	9.2	12.3	13.2

Исследуемые электролиты позволяют сформировать покрытия с различной топографией и микрошероховатостью (табл. 2). В покрытиях, электроосажденных из ацетатных электролитов, видна неравномерность структуры, зерна никеля

конусообразные (рис. 1, *з*). Как было выяснено ранее [29], из данного электролита формируются содержащие большое количество трещин осадки. Покрытия из тарtratных (рис. 1, *б*, *д*) и изобутиратных (рис. 1, *в*, *е*) электролитов ха-

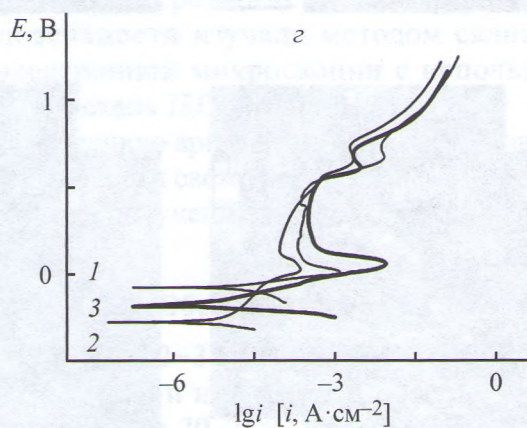
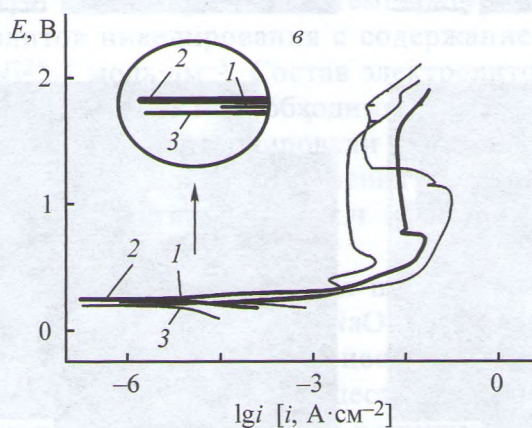
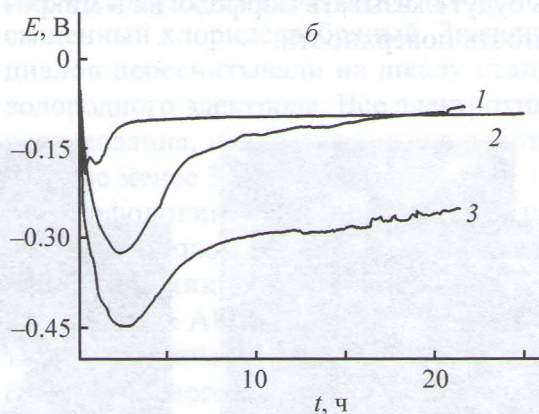
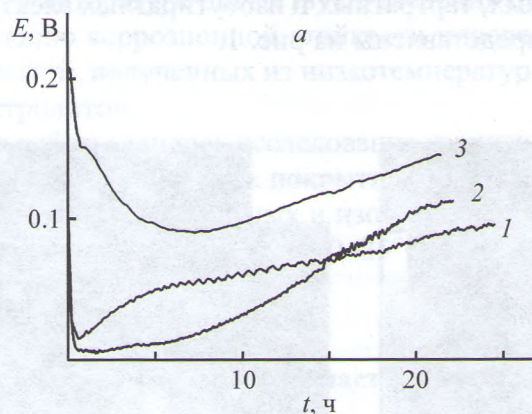


Рис. 2. Зависимость стационарного потенциала от времени выдержки (*а*, *б*) и потенциодинамические поляризационные кривые (*в*, *з*) никелевых (1 — ацетатные, 2 — тарtratные, 3 — изобутиратные растворы) покрытий в 0.5 M H_2SO_4 (*а*, *в*) и в 2 M NaOH (*б*, *з*).

характеризуются большим размером кристаллов и имеют тенденцию к более высокой шероховатости (табл. 2). В ряде работ [19, 21] показано, что последний параметр может оказывать значительное влияние на коррозионные свойства покрытия.

Зависимости изменения стационарного потенциала во времени показывают (рис. 2, а), что в кислых растворах для всех полученных покрытий в первые 5 ч наблюдается постепенное смещение потенциала в электроотрицательную область с последующим плавным сдвигом в электроположительную сторону. Через 24 ч значения составляют 0.142 В для изобутиратного, 0.113 В — для тартратного, 0.096 В — для ацетатного электролитов. В 0.5 М растворе H_2SO_4 стационарный потенциал возвращается к исходному значению в течение 1 сут. В щелочной среде (рис. 2, б) динамика изменения стационарного потенциала для всех покрытий имела одинаковый характер: постепенное смещение в электроотрицательную область в течение первых 2–3 ч опытов, а затем постепенное возрастание до близких к первоначальным значений. Такая динамика изменения потенциала в среде H_2SO_4 и NaOH также может объясняться пассивацией локальных дефектов покрытия. После 5 ч опыта в щелочной среде величины потенциала возвращались к начальным значениям, а затем практически не изменялись.

На всех поляризационных кривых, полученных в исследуемых средах, наблюдаются ак-

тивные—пассивные—транспассивные области (рис. 2, в, г). При этом в растворе H_2SO_4 , как правило, не характерен переход никеля в область пассивного состояния [15]. Подобное поведение покрытия можно объяснить пассивацией поверхности с образованием средних и основных солей никеля. На потенциодинамических кривых при выходе из области пассивного состояния наблюдается пик перед восходящим участком, вероятно обусловленный образованием на поверхности покрытия оксидов-гидроксидов никеля большей валентности [36]. Потенциалы пассивных областей никелевых покрытий, полученных из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов, в исследуемых растворах достаточно близки, при этом в растворе H_2SO_4 пассивная область в 2 раза шире по сравнению с данными, полученными в щелочной среде. Проведенный анализ потенциодинамических поляризационных кривых позволил рассчитать основные параметры электрохимического процесса коррозии никелевых покрытий в исследуемых средах, которые представлены в табл. 3.

Наименее коррозионностойким в щелочной и кислой средах является никелевое покрытие, полученное из ацетатного электролита, для которого значения плотности токов коррозии составили соответственно 135.80 и 2.14 $\mu A \cdot cm^{-2}$. Плотности тока коррозии, рассчитанные для покрытий, электроосажденных из тартратного и изобутиратного электролитов ($\sim 0.5 \mu A \cdot cm^{-2}$),

Таблица 3

Параметры электрохимического процесса, полученные из анализа потенциодинамических поляризационных кривых

Коррозионная среда	Состав электролита никелирования	Потенциал коррозии $E_{кор}$, В	Плотность тока коррозии $i_{кор}$, $\mu A \cdot cm^{-2}$	a_a , В	b_a , В	Ширина области потенциалов пассивного состояния E_p , В
0.5 М H_2SO_4	Ацетатный	0.20	135.80	0.052	0.407	0.50
	Тартратный	0.20	7.40	0.030	0.354	0.83
	Изобутиратный	0.24	4.20	0.033	0.422	0.82
2 М NaOH	Ацетатный	-0.08	2.14	0.036	0.034	0.44
	Тартратный	-0.19	0.59	0.025	0.126	0.45
	Изобутиратный	-0.28	0.49	0.050	0.040	0.43

свидетельствуют о формировании достаточно коррозионностойких покрытий, сравнимых с наноструктурированными осадками никеля [15], что может быть обусловлено образованием на поверхности малорастворимого оксидно-гидроксидного пассивного слоя $\text{Ni}(\text{OH})_2$ и NiO [15, 23]. Большие значения плотности токов коррозии в кислой среде по сравнению со щелочной средой можно объяснить активным растворением никеля в кислой среде. Потенциалы коррозии никеля в среде H_2SO_4 не зависят от состава электролита никелирования и составляют ~ 0.2 В, а в NaOH смещаются в электроотрицательную область, что связано с переходом в пассивное состояние. Потенциалы пассивации никелевых покрытий в среде NaOH практически совпадают.

Диаграммы Найквиста, полученные для никелевых покрытий в среде H_2SO_4 (рис. 3, а),

характеризуются двумя константами времени: емкостной полуокружностью в области высоких и средних частот, которая свидетельствует о лимитирующей стадии переноса заряда в процессе коррозии, и индуктивной областью при малых частотах, характеризующей процесс активного растворения никелевого покрытия в кислой среде. Наличие индукционной составляющей может быть объяснено нестационарными условиями в системе, вызванными процессами адсорбции–десорбции промежуточных частиц, например Ni^+ , и формированием новых центров адсорбции [27]. Наибольший радиус спектров на диаграммах Найквиста и соответственно более высокую коррозионную стойкость в кислой среде показало покрытие, полученное из изобутиратного электролита, что можно объяснить однородной структурой данного покрытия и отсутствием

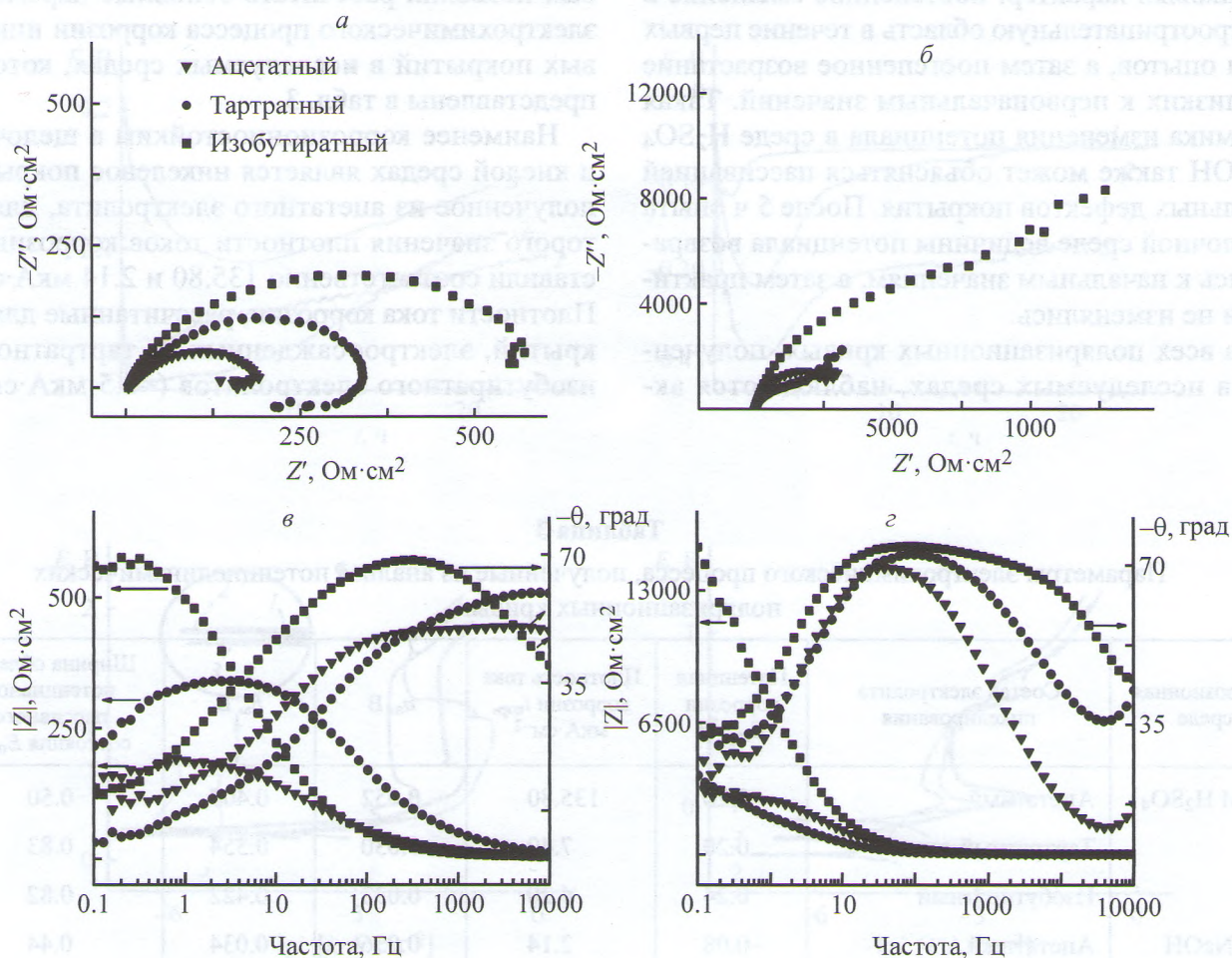


Рис. 3. Спектры импеданса никелевых покрытий, полученных из ацетатных, тартратных и изобутиратных электролитов, представленные в виде диаграмм Найквиста (а, б), и Боде (в, г) в 0.5 М растворе H_2SO_4 (а, в) и 2 М растворе NaOH (б, г).

в нем дефектов (рис. 1). Наименьшую коррозионную стойкость в данных условиях имеет никелевое покрытие, полученное из ацетатного электролита. Это, вероятно, связано с наличием трещин в структуре покрытия, а также меньшим размером зерен покрытия, что в соответствии с классической теорией коррозии сопровождается формированием большого количества гальванопар на границе зерен и, таким образом, увеличивает скорость коррозионного процесса [37, 38]. Полученные результаты хорошо согласуются с поляризационными измерениями.

Из диаграмм Боде для модуля импеданса видно (рис. 2, в), что при низких частотах общее сопротивление поверхности в кислотной среде для никелевых покрытий, полученных из изобутиратных электролитов, составляет $475 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

Диаграммы Найквиста, полученные в щелочной среде (рис. 3), характеризуются двумя константами времени, при этом на спектрах отсутствуют индукционные участки. Наибольшая коррозионная стойкость зафиксирована для никелевых покрытий, полученных из изобутиратного электролита. В области низких частот на

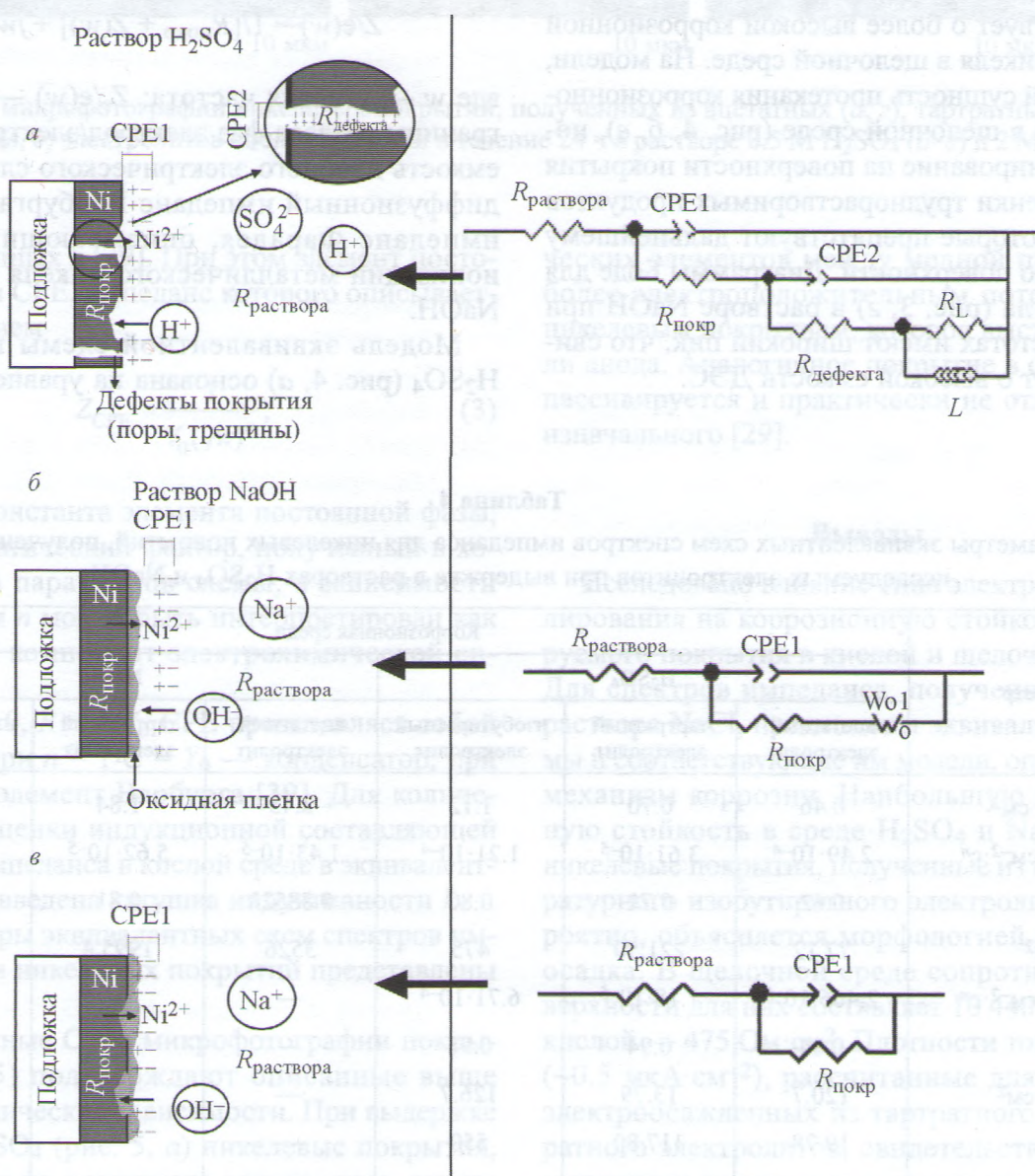


Рис. 4. Эквивалентные схемы и соответствующие механизмы коррозии никелевых покрытий в растворе 0.5 M H₂SO₄ (а) и 2 M NaOH (б, в).

спектре присутствует участок под углом 45° к оси реальной составляющей импеданса, который соответствует появлению диффузионных ограничений в кинетике коррозионного процесса и описывается идеальным элементом Варбурга. Это в свою очередь, наиболее вероятно, свидетельствует об адсорбции продуктов коррозии в виде малорастворимых оксида NiO и гидроксида Ni(OH)₂ на поверхности сплава, которые пассивируют поверхность образца и снижают скорость его дальнейшего растворения. В щелочной среде сопротивление поверхности для никелевых покрытий, полученных из изобутиратных электролитов, составляет $10\,440\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, что свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости никеля в щелочной среде. На модели, отражающей сущность протекания коррозионного процесса в щелочной среде (рис. 4, б, в), показано формирование на поверхности покрытия плотной пленки труднорастворимых продуктов коррозии, которые препятствуют дальнейшему растворению поверхности. Диаграммы Боде для фазового угла (рис. 3, г) в растворе NaOH при средних частотах имеют широкий пик, что свидетельствует о высокой емкости ДЭС.

Для количественного описания спектров импеданса в исследуемых растворах приведены эквивалентные схемы и модели, объясняющие процесс коррозии на границе раздела фаз электрод/электролит (рис. 4). В схемах присутствуют сопротивление раствора $R_{\text{раствора}}$, сопротивление покрытия $R_{\text{покр}}$, диффузионный элемент Варбурга W и элемент постоянной фазы CPE, описывающий емкостной отклик системы, индуктивность L , сопротивление индуктивности R_L . Модель эквивалентной схемы (рис. 4, в) основана на следующих уравнениях реакций [15]:

$$Z(w) = R_{\text{раствора}} + Z_s/e(w), \quad (1)$$

$$Z/e(w) = 1/[R_{\text{покр}} + Z(w)] + jwC, \quad (2)$$

где w — угловая частота; $Z_s/e(w)$ — импеданс границы раздела фаз электрод/электролит; C — емкость двойного электрического слоя; $Z(w)$ — диффузионный импеданс Варбурга, $Z/e(w)$ — импеданс Фарадея, описывающий процесс ионизации металлического никеля в растворе NaOH.

Модель эквивалентной схемы в растворе H₂SO₄ (рис. 4, а) основана на уравнениях реак-

Таблица 4

Параметры эквивалентных схем спектров импеданса для никелевых покрытий, полученных из исследуемых электролитов при выдержке в растворах H₂SO₄ и NaOH

Параметр	Коррозионная среда					
	H ₂ SO ₄			NaOH		
	ацетатный электролит	тарtratный электролит	изобутиратный электролит	ацетатный электролит	тарtratный электролит	изобутиратный электролит
$R_{\text{раствора}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	0.46	0.70	1.12	2.43	1.84	1.49
$Y_{\text{CPE1}}, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	$2.49\cdot 10^{-4}$	$3.61\cdot 10^{-5}$	$1.21\cdot 10^{-4}$	$1.43\cdot 10^{-5}$	$5.62\cdot 10^{-5}$	$1.84\cdot 10^{-5}$
n_{CPE1}	0.62	0.71	0.80	0.88523	0.81	0.81
$R_{\text{покр}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	77.12	221.50	475	3526	1995.4	10440
$Y_{\text{CPE2}}, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	$2.466\cdot 10^{-5}$	$1.18\cdot 10^{-5}$	$6.71\cdot 10^{-4}$	—	—	—
n_{CPE2}	0.84	0.94	0.98	—	—	—
$R_{\text{дефекта}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	120.7	13.79	126.7	—	—	—
$R_L, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	19.78	117.80	550	—	—	—
$L, \text{ Гн см}^2$	1.98	48.75	0.76	—	—	—
$W, \text{ кОм}^{-1}\cdot\text{с}^{0.5}\cdot\text{см}^{-2}$	—	—	—	—	0.47	0.13

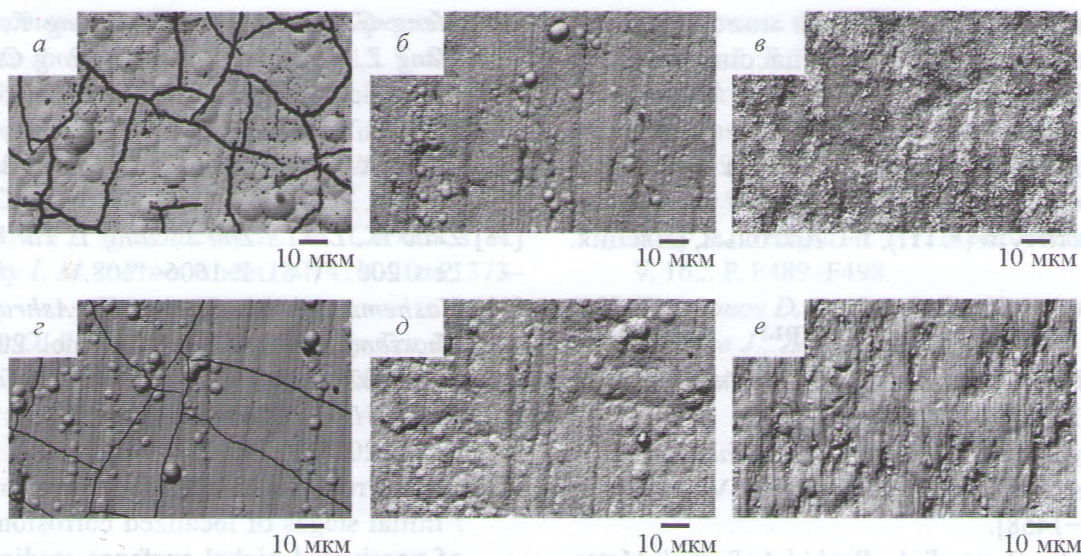


Рис. 5 СЭМ микрофотографии никелевых покрытий, полученных из ацетатных (а, з), тартратных (б, д), изобутиратных (в, е) электролитов после выдержки в течение 24 ч в растворе 0.5 М H_2SO_4 (а-в) и 2 М $NaOH$ (з-е).

ший, описанных в [29]. При этом элемент постоянной фазы СРЕ, импеданс которого описывается уравнением

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n}, \quad (3)$$

где Y_0 — константа элемента постоянной фазы, n — математический фактор, полученный в ходе подбора параметров схемы, в зависимости от значения n может быть интерпретирован как различный компонент электрохимической системы.

При $n = 0$, $R = 1/Y_0$ СРЕ представляет собой резистор, при $n = 1$ $C = Y_0$ — конденсатор, при $n = 0.5$ — элемент Варбурга [39]. Для количественной оценки индукционной составляющей спектров импеданса в кислой среде в эквивалентную схему введена катушка индуктивности L .

Параметры эквивалентных схем спектров импеданса для никелевых покрытий представлены в табл. 4.

Полученные СЭМ микрофотографии покрытий (рис. 5) подтверждают описанные выше электрохимические зависимости. При выдержке в среде H_2SO_4 (рис. 5, а) никелевые покрытия, полученные из ацетатного электролита, активно растворяются. Это связано с формированием по всей поверхности локальных гальвани-

ческих элементов между медной подложкой с более электроположительным потенциалом и никелевым покрытием, которое выступает в роли анода. Аналогичное покрытие в среде $NaOH$ пассивируется и практически не отличается от изначального [29].

Выводы

Исследовано влияние типа электролита никелирования на коррозионную стойкость формируемого покрытия в кислой и щелочной средах. Для спектров импеданса, полученных в 0.5 М растворе $NaCl$, предложены эквивалентные схемы и соответствующие им модели, описывающие механизм коррозии. Наибольшую коррозионную стойкость в среде H_2SO_4 и $NaOH$ имеют никелевые покрытия, полученные из низкотемпературного изобутиратного электролита, что, вероятно, объясняется морфологией никелевого осадка. В щелочной среде сопротивление поверхности для них составляет $10\,440 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а в кислой — $475 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Плотности тока коррозии ($\sim 0.5 \text{ мкА}\cdot\text{см}^{-2}$), рассчитанные для покрытий, электроосажденных из тартратного и изобутиратного электролитов, свидетельствуют о формировании достаточно коррозионностойких покрытий, сравнимых с наноструктурированными осадками никеля, что может быть обусловлено

образованием на поверхности малорастворимого оксидно-гидроксидного пассивного слоя $\text{Ni}(\text{OH})_2$ и NiO .

Авторы выражают благодарность за проведение исследований (атомно-силовой микроскопии) на оборудовании Королевского технологического института (КТН), г. Стокгольм, Швеция.

Список литературы

- [1] Легкая Д. А., Соловьёва Н. Д., Яковлев А. В. // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 9. С. 1199–1204 [Legkaya D. A., Solov'eva N. D., Yakovlev A. V. // Russ. J. Appl. Chem. 2017. V. 90. N 9. P. 1454–1458].
- [2] Rahimi E., Davoodi A., Rashid A. R. K. // Mater. Lett. 2018. V. 210. P. 341–344.
- [3] Mech K. // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 315. P. 232–239.
- [4] Chao-qun Li, Xin-hai Li, Zhi-xin Wang, Hua-jun Guo // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2007. V. 17. P. 1300–1306.
- [5] Gamburg Yu. D., Grosheva M. Yu., Biallozor S., Hass M. // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 150. P. 95–100.
- [6] Xiang T., Ding S., Li C., Zheng Sh., Hu W., Wang J., Liu P. // Mater. Design. 2017. V. 114. P. 65–72.
- [7] Esmailzadeh S., Khorsand S., Raeissi K., Ashrafizadeh F. // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 283. P. 337–346.
- [8] Danişman M. // Mater. Chem. Phys. 2016. V. 171. P. 276–280.
- [9] Zarebidaki A., Mahmoudikohani H., Aboutalebi M. R. // J. Alloys Compd. 2014. V. 615. P. 825–830.
- [10] Seyeux A., Maurice V., Klein L. H., Marcus P. // Electrochim. Acta. 2008. V. 54. P. 540–544.
- [11] López J. R., Stremstoerfer G., Trejo G., Ortega R., Pérez J. J., Meas Y. // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. V. 7. P. 12244–12253.
- [12] Vite-Torres J., Vite-Torres M., Aguilar-Osorio R., Reyes-Astivia J. E. // FME Transactions. 2015. V. 43. P. 206–210.
- [13] Cheng W., Ge W., Yang Q., Qu X. // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 276. P. 604–608.
- [14] Yong P., Yi-Chun Z., Zhao-Feng Z., Yong-Li H., Yan-Guo L., Chang-Qing S. // Trans. Nonferrous. Soc. China. 2007. V. 17. P. 1225–1229.
- [15] Li-Yuan Q., Jian-She L., Qing J. // Trans. Nonferrous. Soc. China. 2010. V. 20. P. 82–89.
- [16] Meng G., Li Y., Shao Y., Zhang T., Zhang T., Wang Y., Wang F., Cheng X., Dong C., Li X. // J. Mater. Sci. Technol. 2016. V. 32. P. 465–469.
- [17] Meng G., Li Y., Shao Y., Zhang T., Wang Y., Wang F., Cheng X., Dong C., Li X. // J. Mater. Sci. Technol. 2015. V. 31. P. 1186–1192.
- [18] Zhao H., Liu L., Zhu J., Tang Y., Hu W. // Mater. Lett. 2007. V. 61. P. 1606–1608.
- [19] Hashemzadeh M., Raeissi K., Ashrafizadeh F., Khorsand S. // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 283. P. 318–328.
- [20] Jinlong L., Tonxiang L., Chen W. // J. Solid State Chem. 2016. V. 240. P. 109–114.
- [21] Local Probe Techniques for Corrosion Research / Initial stages of localized corrosion by pitting of passivated nickel surfaces studied by scanning tunnelling microscopy (STM) and atomic force microscopy (AFM) / Eds R. Oltra, V. Maurice, R. Akid, P. Marcus. Elsevier, 2014. P. 208.
- [22] Sivasakthi P., Sekar R., Ramesh Bapu G. N. K. // Mater. Res. Bull. 2015. V. 70. P. 832–839.
- [23] Nasirpour F., Sanaeian M. R., Samardak A. S., Sukovatitsina E. V., Ognev A. V., Chebotkevich L. A., Hosseini M.-G., Abdolmaleki M. // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 276. P. 604–608.
- [24] Imaz N., García-Lecina E., Díez J. A. // Trans. Instit. Met. Finish. 2010. V. 88. P. 256–261.
- [25] Rofagha R., Langar R., EI-Sherik A. M., Erb U., Palumbo G., Aust K. T. // Scr. Metallurgica Mater. 1991. V. 25. P. 2867–2872.
- [26] Rashidi A. M., Amadeh A. // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 204. P. 353–358.
- [27] Wasekar N. P., Haridoss P., Seshadri S. K., Sundararajan G. // Surf. Coat. Technol. 2016. V. 291. P. 130–140.
- [28] Schüler K., Philippi B., Weinmann M., Marx V. M., Vehoff H. // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 3945–3955.
- [29] Антихович И. В., Харитонов Д. С., Черник А. А., Добрыдень И. Б. // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 4. С. 469–476 [Antsikhovich I. V., Kharitonov D. S., Chernik A. A., Dobryden I. B. // Russ. J. Appl. Chem. 2017. V. 90. N 4. P. 566–573].
- [30] Семенова И. В., Хорошилов А. В., Флорианович Г. М. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2006. 336 с.
- [31] Целуйкин В. Н., Толстова И. В., Соловьёва Н. Д., Гунькин И. Ф. // Гальванотехника и обраб. пов-ти. 2006. Т. XIV. № 1. С. 28–31.

- [32] Антихович И. В., Черник А. А., Жарский И. М., Болвако А. К. // Электрохимия. 2015. Т. 51. № 3. С. 1–6.
- [33] Антихович И. В., Черник А. А., Жарский И. М. / Гальванотехника и обраб. пов-ти. 2015. Т. 23. № 2. С. 38–43.
- [34] Antihovich I. V., Ablazhey N. M., Chernik A. A., Zharsky I. M. // Proc. Chem. 2014. V. 10. P. 373–377.
- [35] Долгих О. В., Соцкая Н. В., Зуен Ву Тху, Котлярова Е. А., Агапов Б. Л. // Физикохимия поверхности и защита металлов. 2009. Т. 45. С. 636.
- [36] Справочник химика: В 6 т. / Гл. ред. Б. П. Никольский. Т. 3. Л., 1964. 1005 с.
- [37] Patrick I. D., Francescetti D. R. // Impedance Spectroscopy / Ed J. R. Macdonald. Wiley, New York, 1987. P. 27.
- [38] Kumar Singh R., Devivaraprasad Kar R., Chakraborty A., Neergat M. // J. Electrochem. Soc. 2015. V. 162. P. F489–F498.
- [39] Kharitonov D. S., Ornek C., Claesson P. M., Sommertune J., Zharskii I. M., Kurilo I. I., Pan J. // J. Electrochem. Soc. 2018. V. 165. P. C116–C126.