

УДК 620.193.26 + 544.636

Д. С. ХАРИТОНОВ,  
И. И. КУРИЛО, И. М. ЖАРСКИЙ

## КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА АМЦ В ЩЕЛОЧНЫХ СРЕДАХ В ПРИСУТСТВИИ ОРТОВАНАДАТА НАТРИЯ

*Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Беларусь*

Методом электрохимической импедансной спектроскопии изучено коррозионное поведение сплава АМЦ в 0,05 М растворе хлорида натрия (рН 10), содержащем 0,003 моль/дм<sup>3</sup> ортованадата натрия. Показано, что на начальном этапе испытаний в исследуемом электролите наблюдается снижение коррозионной активности сплава алюминия, обусловленное адсорбцией на его поверхности монованадионов. Варьирование рН раствора в процессе коррозии способствует протеканию процессов полимеризации-деполимеризации ванадатов, а также процессов окисления-восстановления адсорбированных на поверхности сплава ванадийсодержащих соединений, что приводит к существенному изменению их ингибирующих свойств. Установлено, что при увеличении продолжительности выдержки образцов в ванадийсодержащих растворах хлорида натрия от 1 до 24 ч происходит формирование на их поверхности компактных защитных пленок, а общее сопротивление поверхности сплава возрастает в 4,3 раза.

Corrosion behavior of AMZ (AA3003) alloy in 0.05 M NaCl solutions (pH 10) containing 0.003 mol/dm<sup>3</sup> of sodium orthovanadate has been studied by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method. It has been shown, that at the first stage of the treatment a decrease in aluminium alloy corrosion activity is observed due to adsorption of monovanadate ions. Variation of the solution pH during the process of corrosion promotes polymerization-depolymerization and reduction-oxidation of adsorbed vanadium compounds, which results in sufficient changes in their inhibition properties. It has been found that an increase in the duration of the samples treatment in vanadium-containing solutions from 1 to 24 hours caused the formation of protective films on their surface and 4.3-fold rise of total surface resistance.

*Ключевые слова:* коррозия; ортованадат натрия; ингибитор; бестоковый потенциал; электрохимическая импедансная спектроскопия.

*Keywords:* corrosion; sodium orthovanadate; inhibitor; open-circuit potential; electrochemical impedance spectroscopy.

Широкое промышленное применение сплавов алюминия обусловлено их относительно высокими эксплуатационными характеристиками и коррозионной устойчивостью, легкостью обработки, тепло- и электропроводностью,

малым удельным весом, привлекательным внешним видом, нетоксичностью и возможностью вторичной переработки.

Гетерогенная микроструктура алюминиевых сплавов обуславливает их подверженность локальной коррозии и коррозии под напряжением [1]. Основная причина высокой склонности сплавов алюминия к локальной коррозии – различие электродных потенциалов алюминиевой матрицы и интерметаллических частиц, входящих в состав сплавов, что приводит к формированию микрогальванических пар на границе раздела фаз алюминиевая матрица – интерметаллическая частица [2–4]. С повышением степени чистоты алюминия наблюдается увеличение его стойкости к питтинговой коррозии [5].

Долгое время для защиты сплавов алюминия от коррозии применяли ингибиторы на основе соединений хрома(VI) [1]. Однако высокая экологическая опасность и канцерогенные свойства этих соединений привели к ужесточению норм их промышленного использования. Поэтому в настоящее время во всем мире ведется поиск более безопасных для окружающей среды и здоровья человека альтернатив соединениям хрома(VI), среди которых наиболее перспективными являются ингибиторы на основе соединений ванадия. В литературе описано их применение для защиты от коррозии стали [6–8], цинка [9], некоторых сплавов алюминия [10–14] и магния [15].

В зарубежной литературе основное внимание уделяется защите от коррозии широко применяемых в аэрокосмической отрасли медьсодержащих сплавов алюминия, таких как AA2024-T3 (в отечественной системе маркировки сплав Д16). Авторами ряда работ [10–16] установлено, что ингибирующее действие растворимых ванадатов по отношению к этим сплавам связано с их специфической адсорбцией на поверхности медьсодержащих интерметаллических частиц состава  $Al_2CuMg$ . Это снижает электрохимическую активность последних и смещает значение бестокового потенциала в катодную область до значений, при которых не происходит селективного растворения Mg и его удаления из интерметаллических частиц  $Al_2CuMg$ . Сведения о возможности применения ванадатов для коррозионной защиты сплавов алюминия, легированных кремнием, марганцем, литием, отсутствуют.

Щелочи, как правило, агрессивны по отношению к алюминию, например, гидроксид натрия даже используется для химического фрезерования алюминия. В растворах более слабых щелочей, таких как карбонат натрия, коррозионное разрушение металла можно предупредить, используя ингибиторы. Сплавы алюминия с магнием или магнием и кремнием обычно более стойки в щелочных средах, чем другие алюминиевые сплавы [17].

Поскольку марганецсодержащие сплавы алюминия широко применяются при изготовлении теплообменников и радиаторов, различных емкостей для химических веществ, корпусов и деталей оборудования, железнодорожных вагонов, строительных конструкций, бурильных труб [1], которые часто эксплуатируются в щелочных средах, изучение путей коррозионной защиты марганецсодержащих сплавов алюминия в этих условиях представляет большой

практический интерес. Научная значимость такого рода исследований состоит в выявлении особенностей механизма действия ванадатов, ингибирующих коррозию сплавов алюминия, в зависимости от природы легирующих добавок и состава коррозионной среды.

Цель данного исследования – изучение влияния ингибирующих свойств ортованадата натрия на коррозионное поведение марганецсодержащего сплава алюминия марки АМЦ в щелочной хлоридсодержащей среде.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследований в данной работе являлся сплав алюминия марки АМЦ (АА3003). Номинальный состав сплава по ГОСТ 4784–97, %: Si – 0,60; Fe – 0,7; Cu – 0,05–0,20; Mn – 1,00–1,50; Mg – 0,20; Zn – 0,1; Ti – 0,10; Al – баланс. В исследованиях использовали предварительно подготовленные образцы размером  $20 \times 20 \times 2$  мм.

Подготовка образцов алюминия включала следующие операции:

1) полирование поверхности образцов на полировальной машине LaboPol 5 с последовательным использованием наждачной бумаги P250, P500, P800 и P1200 в водной среде;

2) промывка образцов в 18,2 МΩ деионизированной воде (система деионизации Milli-Q). Для дальнейшего хранения образцы помещали в 99,9 % этанол;

3) финишная полировка с применением алмазной пасты с размером зерна 1 мкм в среде 99,9 % этанола;

4) ультразвуковая очистка в течение 20 мин для удаления остатков полировальной пасты в среде 99,9 % этанола;

5) очистка поверхности сплава сжатым азотом.

В качестве коррозионной среды использовали 0,05 М раствор NaCl без добавки и с добавкой ортованадата натрия в количестве  $0,003 \text{ моль/дм}^3$ , поддерживая pH равным десяти. Корректировку pH проводили 0,1 М растворами NaOH и  $\text{HNO}_3$  (х. ч.).

Выбор состава коррозионной среды обусловлен тем, что коррозионная активность естественных водных сред обусловлена прежде всего содержанием в них хлорид-ионов, которые обладают выраженными деполаризующими свойствами. Содержание ионов  $\text{Cl}^-$  в природных водах может колебаться в пределах от 50 до  $5000 \text{ мг/дм}^3$ . При содержании хлорид-ионов более  $150 \text{ мг/дм}^3$  вода является сильно агрессивной, что обуславливает достаточно высокую скорость коррозии металлов, находящихся в контакте с этими средами. Так как эффективное использование ингибиторов коррозии алюминия в щелочных средах возможно при pH, не превышающих 11, для исследований использовали растворы с pH 10. Концентрацию ортованадата натрия выбирали исходя из экономической целесообразности и экологической безопасности промышленного использования данного соединения в качестве ингибитора коррозии алюминия.

Импедансные спектры снимали на потенциостате Solartron 1287А в комплексе с модулем анализа импеданса Solartron 1260А. Спектры импеданса записывали

при значении бестокового потенциала через 1, 8 и 24 ч после погружения образцов сплава АМЦ в исследуемые растворы. Диапазон частот измерения составлял  $10^5$ – $10^{-2}$  Гц, амплитуда колебаний – 10 мВ, количество точек на декаду колебаний – 7. Количество параллельных опытов – не менее трех.

Измерения проводили в трехэлектродной ячейке с боковым креплением рабочего электрода и хлорсеребряным электродом сравнения. Вспомогательным электродом служила платиновая сетка. Площадь рабочего электрода во всех исследованиях составляла  $1 \text{ см}^2$ . Все потенциалы, представленные в работе, переведены в шкалу стандартного водородного электрода.

Анализ спектров импедансной спектроскопии, подбор эквивалентных схем и расчет параметров их элементов проводили с использованием программного обеспечения «ZView» и «Nova 1.11».

Диаграммы Пурбе, фазовые и фракционные диаграммы для ванадийсодержащих систем строили с применением программного обеспечения «Medusa» [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения ионных форм ванадия в исследуемых растворах с помощью ПО «Medusa» построена диаграмма Пурбе, которая представлена на рис. 1.

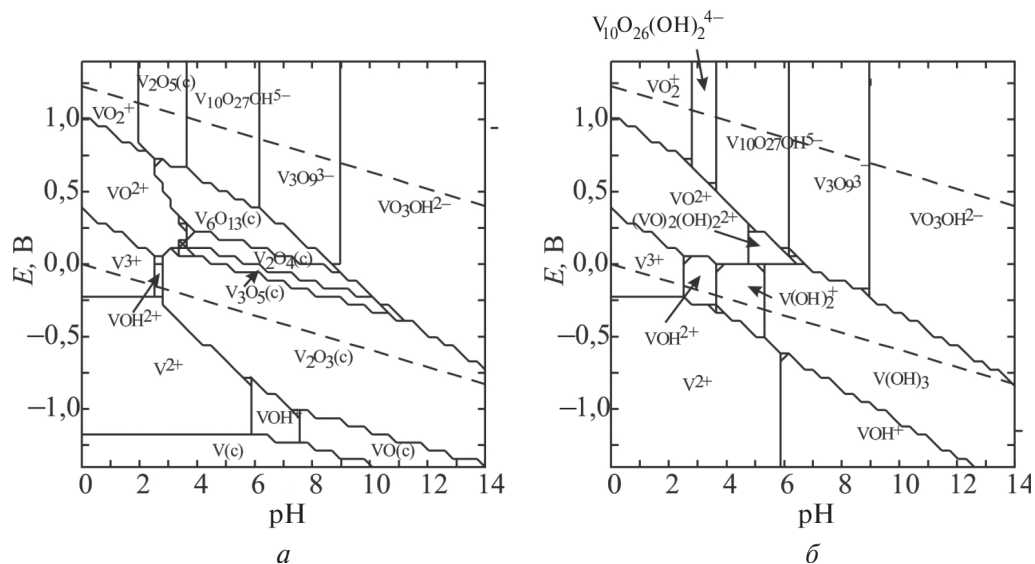


Рис. 1. Диаграмма Пурбе для соединений ванадия в растворе состава, моль/дм<sup>3</sup>:  
NaCl – 0,05; Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> – 0,003:

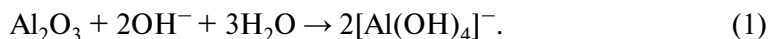
*a* – растворимые и нерастворимые формы; *б* – только растворимые формы

Начальное значение pH приготовленных растворов NaCl составляло 6,0–6,3. При введении в фоновый электролит 0,003 моль/дм<sup>3</sup> ортованадата натрия pH увеличивался до 11. Согласно диаграмме в этом растворе преимущественными

формами существования ванадия(V) являются тетраэдрически координированные монованадат-ионы. Корректировка значения рН приготовленных ванадий-содержащих растворов до 10 согласно диаграмме не приводит к существенному изменению ионных форм ванадия в растворе (рис. 1). При дальнейшем снижении рН монованадат-ионы полимеризуются до три- и тетраванадат-ионов, а затем – до гидратированных в различной степени октаэдрически координированных декаванадат-ионов [9, 16]. При значениях рН растворов менее 6 возможно образование катионных форм  $V^{2+}$ ,  $VO^{2+}$ ,  $V^{3+}$  и  $VO_2^+$ . В растворе также возможно образование малорастворимых оксидов ванадия(II, III, IV, V).

Отсутствие окраски у содержащих ванадат-ионы растворов с рН 11 свидетельствует о существовании в растворе бесцветных соединений ванадия состава  $VO_3OH^{2-}$ ,  $V_2O_7^{4-}$  и  $VO_4^{3-}$  [18]. При постепенном снижении рН раствора до 10 введением 1 М раствора  $HNO_3$  наблюдается появление бледной желто-оранжевой окраски раствора, что можно объяснить значительным локальным подкислением раствора, сопровождающимся образованием устойчивых при низких значениях рН поливанадат-ионов различного строения [18]. Поскольку деполимеризация образовавшихся поливанадат-ионов протекает очень медленно [19], для установления в растворах химического равновесия после приготовления их выдерживали в течение 24 ч при температуре  $20 \pm 1$  °С до исчезновения окраски.

Динамика изменения бестокового потенциала сплава АМЦ в 0,05 М растворе NaCl (рН 10) представлена на рис. 2, а. Согласно полученным данным с увеличением продолжительности выдержки образца в фоновом электролите наблюдается постепенное смещение бестокового потенциала в электроположительную область, что можно объяснить изменением электрохимических характеристик поверхности в процессе растворения оксидной пленки и адсорбции продуктов коррозии на поверхности сплава. Через 10 ч после начала опыта устанавливается постоянное значение бестокового потенциала, которое в среднем составляет около  $-0,395$  В. Значительное время стабилизации бестокового потенциала в щелочной среде, вероятно, объясняется активным взаимодействием поверхности сплава с коррозионной средой:



Динамика изменения бестокового потенциала сплава АМЦ в 0,05 М растворах NaCl (рН 10), содержащих ортованадат натрия, представлена на рис. 2, б. Резкое уменьшение электродного потенциала в первые 2 ч опыта связано, по видимому, с адсорбцией ванадат-ионов на поверхности сплава и снижением ее электрохимической активности. Дальнейшее увеличение значений стационарного потенциала может быть связано с тем, что при растворении защитной оксидной пленки по реакции (1) происходит постепенное уменьшение рН в приэлектродном слое. Это в свою очередь приводит к образованию в объеме электролита поливанадат-ионов, которые обладают существенно меньшей ингибирующей способностью по сравнению с монованадат-ионами [9, 16, 18].

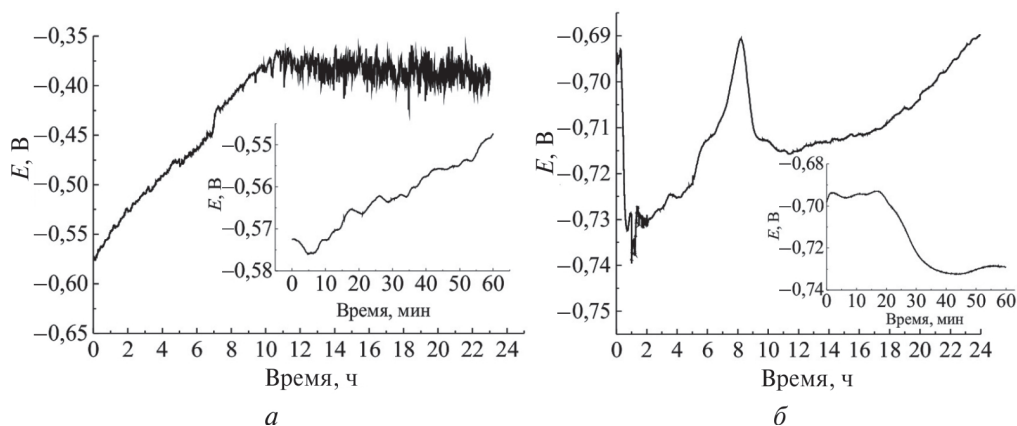


Рис. 2. Изменение бестокового потенциала сплава АМЦ во времени.

Состав растворов, моль/дм<sup>3</sup>:

*a* – 0,05 NaCl; *б* – 0,05 NaCl + 0,003 Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub>; pH 10

Кроме того, при регистрируемых значениях электродного потенциала снижение pH приводит к восстановлению адсорбированных ванадат-ионов до соединений ванадия(III) (рис. 1, 3).

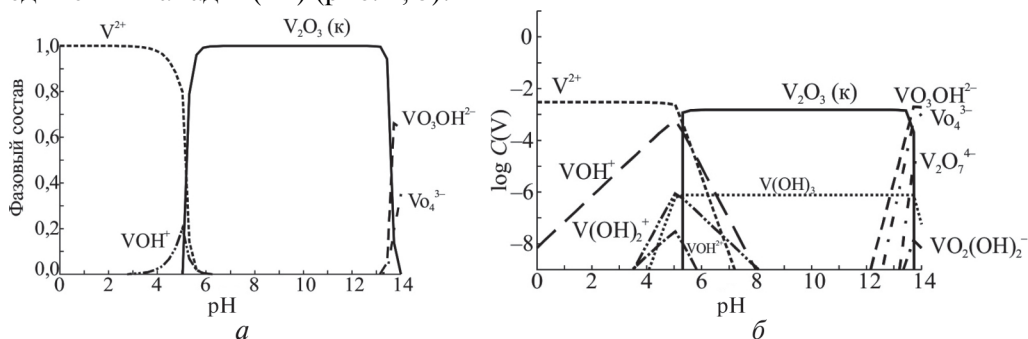
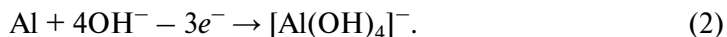


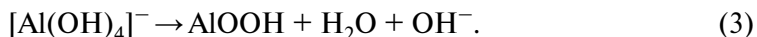
Рис. 3. Фазовая (*a*) и фракционная (*б*) диаграммы для соединений ванадия в растворе, содержащем 0,003 моль/дм<sup>3</sup> Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> и 0,05 моль/дм<sup>3</sup> NaCl, при стационарном потенциале –0,714 В

При стационарном потенциале –0,714 В в диапазоне pH 5–13 в исследуемых системах преобладающей формой является оксид ванадия(III), который при pH менее 5 восстанавливается до V<sup>2+</sup> (рис. 3, *a*). В случае низкого содержания соединений ванадия в приповерхностном слое наряду с V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> может существовать гидроксид ванадия(III), который при снижении pH постепенно переходит в основные соли, а также восстанавливается до VOH<sup>+</sup> (рис. 3, *б*). Изменение валентных форм ванадия в приповерхностном слое приводит к увеличению значения бестокового потенциала на 0,100–0,250 В, которое наблюдается для всех исследованных образцов сплава АМЦ в данном растворе через 5–9 ч после на-

чала опыта (рис. 2, б). Полученную зависимость можно объяснить снижением ингибирующих свойств образующихся соединений ванадия и активацией процесса растворения алюминия:



Накопление в приэлектродной области анионов  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  расширяет область термодинамической устойчивости оксигидроксидов алюминия и по данным [20] приводит к протеканию процесса:



Наблюдаемое при этом увеличение значения pH в приэлектродном слое вызывает деполимеризацию поливанадат-ионов в растворе (см. рис. 1), а также окисление соединений ванадия(II) и образование  $\text{V}(\text{OH})_3$ . Эти процессы способствуют снижению электрохимической активности сплава и смещению стационарного потенциала в катодную область (см. рис. 2).

Результаты импедансной спектроскопии поверхности образцов сплава АМЦ после их выдерживания в исследуемых растворах с pH 10 представлены на рис. 4.

Анализ диаграмм Найквиста (рис. 4, а) показал, что для образцов сплава АМЦ, выдержанных в 0,05 М растворе NaCl в течение 1 ч, спектр импеданса имеет форму двух искаженных полуокружностей, что характерно для процессов с лимитирующей стадией переноса заряда. На полученном спектре можно выделить две временные константы, что указывает на присутствие на поверхности сплава оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеющей неоднородную пористую структуру. С увеличением времени выдержки образцов в растворе до 8 ч наблюдается увеличение доли активного растворения сплава (увеличение Рэндоловской части спектра) и появление прямого участка спектра под углом около  $45^\circ$  к оси абсцисс, что свидетельствует о диффузионном контроле процесса коррозии.

После выдерживания образцов сплава АМЦ в исследуемом растворе в течение 24 ч спектр импеданса представляет собой слабо искаженную полуокружность, что характерно для процессов, протекающих в кинетической области. Наличие одной временной константы, исчезновение диффузионного участка спектра и существенное увеличение значений реальной составляющей импеданса  $Z'$  свидетельствуют о том, что на поверхности сплава сформирована компактная защитная оксидно-гидроксидная пленка. Наличие в полученных спектрах шумов в области средних частот указывает на увеличение количества локальных дефектов и общей микрошероховатости поверхности сплава АМЦ, что обусловлено его коррозией.

Анализ диаграмм Бode образцов сплава АМЦ, выдержанных в 0,05 М растворе NaCl, показывает, что в течение опыта не происходит изменения сопротивления коррозионной среды (участок высоких частот), при этом при увеличении продолжительности выдержки от 1 до 24 ч общее сопротивление поверхности сплава (участок низких частот) возрастает от  $10^4$  до  $10^5$  Ом/см<sup>2</sup>



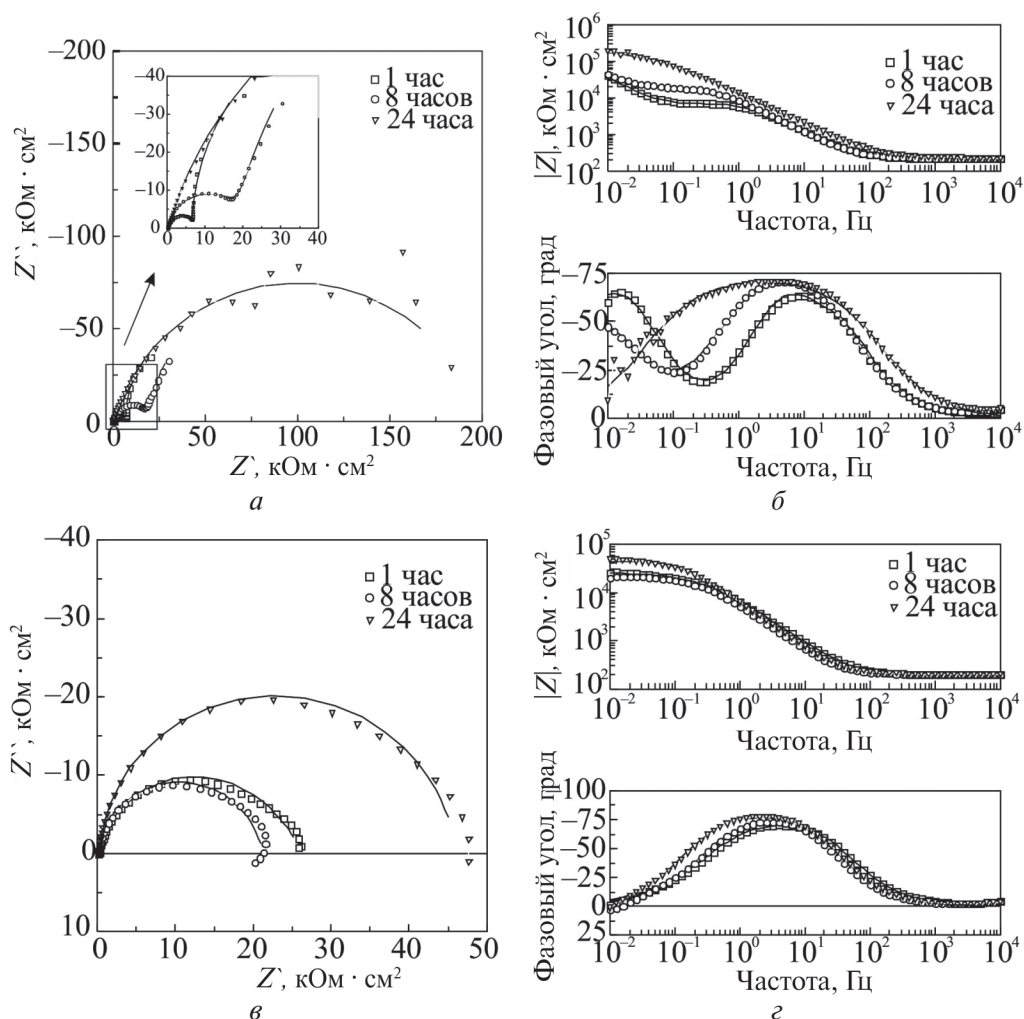


Рис. 4. Результаты импедансной спектроскопии сплава АМЦ в виде диаграмм Найквиста (а, в) и Боде (б, г) после выдерживания в течение 1, 8 и 24 ч в 0,05 М растворах NaCl без (а, б) и с добавкой 0,003 моль/дм<sup>3</sup> Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> при pH 10.

Символами обозначены экспериментальные данные, линиями – результаты подбора параметров эквивалентных схем

(рис. 4, б). Это согласуется с данными диаграмм Найквиста и свидетельствует об экранировании поверхности образца защитной пленкой, обладающей относительной коррозионной устойчивостью.

Диаграммы Найквиста для образцов сплава АМЦ, выдержанных в 0,05 М растворе хлорида натрия с добавкой 0,003 моль/дм<sup>3</sup> ортованадата натрия, имеют вид искаженных полуокружностей (рис. 4, в). Наличие двух временных констант указывает на формирование на поверхности образцов пористых пленок.



Анализ диаграмм показывает, что при увеличении продолжительности выдержки образцов в ванадийсодержащем электролите от 1 до 8 ч наблюдается уменьшение амплитуды спектра. Это свидетельствует об активации процесса коррозии сплава и хорошо согласуется с динамикой изменения величины стационарного электродного потенциала (рис. 2, б). Увеличение времени выдержки в растворе до 24 ч приводит к возрастанию амплитуды спектра импеданса, что указывает на увеличение коррозионной устойчивости образца.

Анализ диаграмм Боде (рис. 4, з) показывает, что наименьшее общее сопротивление поверхности имеют образцы, выдержанные в растворах хлорида натрия, содержащих 0,003 моль/дм<sup>3</sup> ортованадата натрия, в течение 8 ч. В случае образцов, выдержанных в данных растворах в течение 24 ч, наблюдается увеличение общего сопротивления поверхности примерно до  $5 \cdot 10^4$  Ом/см<sup>2</sup>.

Для определения параметров двойного электрического слоя на границе электрод – электролит использовали эквивалентные схемы, представленные на рис. 5. Схема 5, а описывает полученные спектры с одной временной константой, схема 5, б – спектр с диффузионными ограничениями, схема 5, в – спектры с двумя временными константами. В используемых схемах R1 соответствует сопротивлению раствора, R2 – сопротивлению переноса заряда, Q1 – емкости барьерного слоя на поверхности сплава, W – диффузионному элементу Варбурга, R3 и Q2 – сопротивлению и емкости пленки на поверхности сплава соответственно.

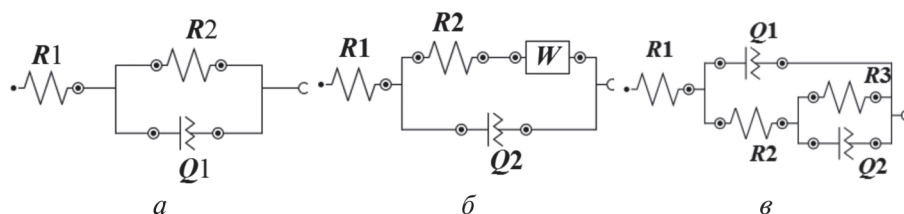


Рис. 5. Эквивалентные схемы, использовавшиеся для интерпретации спектров импеданса:  
а –  $[R(RQ)]$ ; б –  $[R(Q[RW])]$ ; в –  $[R(Q[R(RQ)])]$

В предложенных эквивалентных схемах вместо конденсатора использовали элемент постоянной фазы Q, учитывающий дефекты поверхности сплава, возникающие в ходе процесса коррозии. Значения параметров эквивалентных схем представлены в таблице.

Параметры эквивалентных схем спектров импеданса

Состав р-ра, моль/дм <sup>3</sup>	Время выдержки в р-ре, ч	R1, Ом · см <sup>2</sup>	Q1, μСм · с <sup>n</sup> /см <sup>2</sup>	R2, кОм · см <sup>2</sup>	Q2, μСм · с <sup>n</sup> /см <sup>2</sup>	R3, кОм · см <sup>2</sup>
0,05 NaCl	1	216,2	44,0	30,4	10,5	4,97
0,05 NaCl	8	215,8	19,9	33,7	–	–

Окончание таблицы

Состав р-ра, моль/дм <sup>3</sup>	Время выдержки в р-ре, ч	R1, Ом · см <sup>2</sup>	Q1, μСм · с <sup>n</sup> /см <sup>2</sup>	R2, кОм · см <sup>2</sup>	Q2, μСм · с <sup>n</sup> /см <sup>2</sup>	R3, кОм · см <sup>2</sup>
0,05 NaCl	24	213,3	16,7	110,1	—	—
0,05 NaCl + 0,003 Na <sub>3</sub> VO <sub>4</sub>	1	198,2	22,9	15,7	7,49	29,1
0,05 NaCl + 0,003 Na <sub>3</sub> VO <sub>4</sub>	8	165,6	6,6	10,3	29,3	21,1
0,05 NaCl + 0,003 Na <sub>3</sub> VO <sub>4</sub>	24	170,1	28,1	67,2	20,7	25,2

Полученные данные свидетельствуют, что для образцов сплава АМЦ, выдержанных в ванадийсодержащих растворах хлорида натрия с рН 10 в течение 1, 8 и 24 ч, значения сопротивления переноса заряда ниже, а сопротивление пленки на поверхности сплава выше, чем у образцов, выдержанных в фоновом электролите при одинаковой продолжительности опыта. Увеличение продолжительности выдержки образцов сплава АМЦ в ванадийсодержащем электролите с 1 до 24 ч приводит к увеличению сопротивления переноса заряда в 4,3 раза.

## ВЫВОДЫ

1. В щелочных средах (рН 10) введение в 0,05 М раствор NaCl 0,003 моль/дм<sup>3</sup> Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub> на начальном этапе приводит к адсорбции ортованадат-ионов на поверхности сплава АМЦ и снижению его коррозионной активности.

2. Уменьшение рН в процессе коррозии сплава АМЦ в щелочных растворах, содержащих ортованадат натрия, при установившихся значениях стационарных потенциалов приводит к протеканию реакций полимеризации и восстановления монованадатов, что снижает их ингибирующие свойства и приводит к активации коррозионного процесса. Увеличение рН способствует протеканию процессов деполимеризации ванадатов и окислению адсорбированных на поверхности электрода соединений ванадия(II, III), что приводит к формированию более устойчивых к коррозии защитных ванадийсодержащих пленок.

3. Процесс коррозии образцов сплава АМЦ, выдержанных в 0,05 М растворе NaCl в течение 1 и 24 ч, лимитируется стадией переноса заряда, а при выдержке в растворе в течение 8 ч наблюдается диффузионный контроль процесса. Для образцов сплава АМЦ, выдержанных в щелочных растворах, содержащих ортованадат натрия, процесс коррозии протекает в кинетической области.

4. Увеличение продолжительности выдержки образцов в ванадийсодержащем электролите от 1 до 24 ч приводит к формированию на их поверхности

компактных защитных пленок и увеличению общего сопротивления поверхности сплава в 4,3 раза.

Авторы выражают благодарность компании Taspo (г. Минск) за предоставленные для исследований образцы алюминия и профессору Пэру Клаессону и профессору Джишану Пану (кафедра химии поверхностных явлений и коррозионных проблем Королевского Технологического Института, г. Стокгольм, Швеция) за помощь в организации и проведении исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Féron D.* Corrosion behavior and protection of copper and aluminium alloys in seawater. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2007.
2. *Cavanaugh M. K., Li J. C., Birbilis N., Buchheit R. G.* Electrochemical Characterization of Intermetallic Phases Common to Aluminum Alloys as a Function of Solution Temperature // *J. Electrochem. Soc.* 2014. Vol. 161, Iss. 12. P. 535–543.
3. *Birbilis N., Buchheit R. G.* Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Aluminum Alloys: An Experimental Survey and Discussion // *J. Electrochem. Soc.* 2005. Vol. 152, Iss. 4. P. 140–151.
4. *Birbilis N., Buchheit R. G.* Investigation and Discussion of Characteristics for Intermetallic Phases Common to Aluminum Alloys as a Function of Solution pH // *J. Electrochem. Soc.* 2008. Vol. 155, Iss. 3. P. 117–126.
5. *Davis J. R.* Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. OH: ASM International, 2000.
6. *Opimakh O. V., Kurilo I. I., Zharsky I. M.* // *Inorganic Materials.* 2014. Vol. 50, Iss. 4. P. 415–418.
7. *Sribharathy V. G., Rajendran S.* Corrosion inhibition of carbon steel by sodium metavanadate // *J. Electrochem. Sci. Eng.* 2012. Vol. 2. P. 121–131.
8. *Zou Z., Li N., Li D.* A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electro-galvanized steel substrates // *J. Alloys and Comp.* 2011. Vol. 509, Iss. 2. P. 503–507.
9. *Hurley B. L., Ralston K. D., Buchheit R. G.* Corrosion Inhibition of Zinc by Aqueous Vanadate Species // *J. Electrochem. Soc.* 2014. Vol. 161, Iss. 10. P. 471–475.
10. *Iannuzzi M., Young T., Frankel G. S.* Aluminum Alloy Corrosion Inhibition by Vanadates // *J. Electrochem. Soc.* 2006. Vol. 153, Iss. 12. P. 533–541.
11. *Кузенков Ю. А., Олейник С. В., Трубецкая Л. Ф.* Бесхроматные конверсионные покрытия на алюминиевом сплаве В95 // *Коррозия: материалы, защита.* 2009. № 4. С. 36–39.
12. *Iannuzzi M., Kovac J., Frankel G. S.* A study of the mechanisms of corrosion inhibition of AA2024-T3 by vanadates using the split cell technique // *Electrochem. Acta.* 2007. Vol. 52, Iss. 12. P. 4032–4042.
13. *Shrestha B. R., Hua Q., Baimposa T.* [et al.]. Real-Time Monitoring of Aluminum Crevice Corrosion and Its Inhibition by Vanadates with Multiple Beam Interferometry in a Surface Forces Apparatus // *J. Electrochem. Soc.* 2015. Vol. 162, Iss. 7. P. 327–332.
14. *Hamdy A. S., Butt D. P.* Novel anti-corrosion nano-sized vanadia-based thin films prepared by sol-gel method for aluminum alloys // *J. Mat. Proc. Tech.* 2007. Vol. 181, Iss. 1–3. P. 76–80.

15. Gray J. E., Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys – a critical review // *J. Alloys and Comp.* 2002. Vol. 336, Iss. 1–2. P. 88–113.
16. Ralston K. D., Buchheit R. D. An Initial Exploration of Corrosion Inhibition of AA6061 and AA7075 by Aqueous Vanadates // *ECS Electrochem. Lett.* 2013. Vol. 2, Iss. 9. P. 35–38.
17. Шрайвер Л. Л. Коррозия. Справочник. М. : Metallurgiya, 1981.
18. Puigdomenech I. Hydra/Medusa Chemical Equilibrium Database and Plotting Software. [www.kemi.kth.se/medusa/](http://www.kemi.kth.se/medusa/). KTH Royal Institute of Technology. 2004.
19. Ralston K. D., Chrisanti S., Young T. L., Buchheit R. G. Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy 2024-T3 by Aqueous Vanadium Species // *J. Electrochem. Soc.* 2008. Vol. 155, Iss. 7. P. 350–359.
20. Heath E., Howarth O. W. Vanadium-51 and oxygen-17 nuclear magnetic resonance study of vanadate(V) equilibria and kinetics // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1981. P. 1105–1110.
21. Синяевский В. С., Вальков В. Д., Калинин В. Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М. : Metallurgiya, 1986.

Поступила в редакцию 05.02.2016