

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
INORGANIC CHEMISTRY

УДК 669.1.546.47.546.88

Поступила в редакцию 27.07.2016

Received 27.07.2016

Н. Е. Акулич, И. М. Жарский, Н. П. Иванова

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

**КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ ВАНАДИЕМ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

Аннотация. Показана возможность электрохимического осаждения легированного ванадием цинкового покрытия из щелочного электролита с содержанием 5,5 г/дм³ Na₃VO₄. Содержание ванадия в цинковом покрытии находится в пределах 1,5–4,1 % при катодной плотности тока осаждения покрытия 1–3 А/дм². Изучен процесс химической пассивации гальванических покрытий в растворе ванадата натрия при температуре 20–40 °С, значение pH которого поддерживалось равным 3 ортофосфорной кислотой. Методом РФА в составе образованных конверсионных покрытий обнаружены Zn, ZnO, V₂O₅, V(HPO₄)₂, Zn₃(PO₄)₂. Ток коррозии пассивированных легированных цинковых покрытий, осажденных при 2 А/дм², в 3 %-ном растворе хлорида натрия снижается в 4,1–12,6 раза по сравнению с непассивированным покрытием. Показано, что конверсионные покрытия на основе ванадия обладают высокой защитной способностью при воздействии раствора ацетата свинца (50 г/дм³).

Ключевые слова: защитная способность, коррозионная стойкость, конверсионное покрытие, пассивация, ток коррозии

Для цитирования. Акулич, Н. Е. Коррозионная стойкость легированных ванадием гальванических цинковых покрытий / Н. Е. Акулич, И. М. Жарский, Н. П. Иванова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 4. – С. 23–30.

N. E. Akulich, I. M. Zharsky, N. P. Ivanova

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

CORROSION RESISTANCE OF VANADIUM-ALLOYED ZINC GALVANIZED COATINGS

Abstract. The possibility of vanadium-alloyed zinc coatings electrochemical deposition from alkaline electrolyte containing 5.5 g/l Na₃VO₄ has been shown. Vanadium content in zinc coating depends on cathodic current density and is 1.5–4.1% under cathodic deposition current 1–3 A/dm². The process of chemical passivation of galvanic coating have been studied in sodium vanadate solution at 20–40 °C temperature, with pH 3 kept constant by phosphoric acid. It has been shown by XRD method that conversion coatings formed consist of Zn, ZnO, V₂O₅, V(HPO₄)₂, Zn₃(PO₄)₂. The corrosion current of passivated alloyed zinc coatings deposited at 2 A/dm² was 4.1–12.6 times less than corrosion current of alloyed zinc in 3% NaCl solution. Conversion coatings demonstrate high protective ability when treated with lead acetate solution (50 g/dm³).

Keywords: protective ability, corrosion durability, conversion coating, passivation, corrosion current

For citation. Akulich N. E., Zharsky I. M., Ivanova N. P. Corrosion resistance of vanadium-alloyed zinc galvanized coatings. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*, 2017, no. 4, pp. 23–30 (In Russian).

Введение. Повышение коррозионной стойкости цинка по-прежнему остается актуальной задачей в гальванотехнике, поскольку цинковые покрытия являются одними из самых дешевых и широко используемых для защиты от атмосферной коррозии стальных конструкций, изделий и деталей машин. Решение этой задачи лежит как в области осаждения сплавов цинка, так и в последующей заключительной обработке гальванических покрытий.

Легирование цинкового покрытия такими металлами как никель, железо, кобальт, молибден, хром, олово повышает его коррозионную стойкость [1–4]. Например, покрытия сплавом Zn–Co

не только улучшают коррозионную стойкость деталей двигателя при высоких температурах [5–7]. Доказано, что добавление молибдена оказывает большое влияние на коррозионное поведение цинка и сплавов на его основе [8, 9]. Защитное действие таких покрытий длилось, как минимум, в 2 раза больше по сравнению с обычными цинковыми покрытиями. Высокой коррозионной стойкостью обладают также композиционные электрохимические покрытия на основе цинка с частицами оксидов в качестве второй фазы [10].

Дополнительное значительное повышение коррозионной стойкости покрытий на основе цинка и его сплавов достигается за счет применения последующей пассивации, в частности хроматной обработки, в результате которой на поверхности образуются малорастворимые соли цинка и хрома [11]. Соединения шестивалентного хрома, к сожалению, являются высокотоксичными и имеют генотоксические последствия, которые могут приводить к канцерогенезу.

С целью исключения использования токсичных соединений шестивалентного хрома при пассивировании цинка в последние годы предлагаются конверсионные покрытия на основе тетрамолибдатов редкоземельных и щелочных металлов [12–14], соединений кремния [15] и титана [16].

Известны работы по исследованию защитной способности конверсионных покрытий, содержащих соединения ванадия, сформированных на алюминии и его сплавах [17, 18]. Показано, что ванадат натрия ингибирует процесс коррозии горячеоцинкованной стали, уменьшая токи коррозии в 21 раз [19].

Цель данной работы – получение легированных ванадием цинковых покрытий, проведение последующей пассивации в растворе ванадата натрия, а также исследование их коррозионной стойкости и защитной способности в 3%-ном растворе NaCl.

Материалы и методы исследования. Электроосаждение цинковых покрытий проводили на пластины из углеродистой стали 08кп ($20 \times 20 \text{ мм}^2$), предварительно механически отполированные, химически обезжиренные в стандартном щелочном растворе и проактивированные в растворе H_2SO_4 50 г/дм^3 . Для осаждения легированного покрытия цинк–ванадий был выбран щелочной электролит цинкования состава (г/дм^3): NaOH – 100; ZnO – 10; блескообразователь Цинкамин 02 – 10; очиститель ДС-ЦО – 5; Na_3VO_4 – 5,5; pH 12. Очиститель ДС-ЦО используется для связывания примесей ионов тяжелых металлов в нерастворимые соли. Электроосаждение сплава проводили при плотности тока $1\text{--}3 \text{ А/дм}^2$ при комнатной температуре. Толщина покрытия составляла 9 мкм.

Для последующего создания конверсионного покрытия (КП) на поверхности свежесозданного сплава образцы погружали в раствор Na_3VO_4 ($0,03$ или $0,045 \text{ моль/дм}^3$), ускоритель процесса $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ $2,6 \text{ г/дм}^3$ и активатор поверхности NaF $0,56 \text{ г/дм}^3$ [20]. Кислотность раствора доводили до значения pH 3 добавлением ортофосфорной кислоты. Время пассивации составляло от 60 до 600 с, температура раствора 20 или 40 °С.

Элементный состав полученных покрытий изучали методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX) на электроном сканирующем микроскопе JSM-5610 LV с приставкой EDX JED-2201. Диапазон измерений концентрации элементов 0,1–100%.

Рентгенографическое исследование фазового состава покрытий выполняли на дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия) с использованием CuK_α излучения. Полученные рентгенограммы обрабатывали с помощью программы EVA, входящей в комплект программного обеспечения дифрактометра Diffract Plus. Фазовый состав определяли с использованием международной базы рентгенографических данных Powder Diffraction File. Изучение поверхности покрытий осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки JSM-5610 LV.

Защитные свойства пассивных пленок на осажденном покрытии оценивали методом капли, согласно которому использовали раствор ацетата свинца с концентрацией 50 г/дм^3 (ГОСТ 9.302–88) и определяли время до появления в основании капли черного пятна контактно выделившегося свинца.

Коррозионную стойкость полученных покрытий оценивали в 3 %-ном растворе NaCl при температуре 20 °С электрохимическим методом. Запись катодных и анодных потенциодинамических поляризационных кривых проводили на потенциостате/гальваностате ISP-PRO в комплекте с компьютером. Использовали стандартную трехэлектродную электрохимическую ячейку с рабочим электродом площадью 1 см^2 , платиновым вспомогательным электродом и насыщенным хлорсеребряным электродом сравнения. Поляризационные кривые снимали со скоростью развертки потенциала $1 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне от $E_{\text{стац}}$ – до $\pm 150 \text{ мВ}$, где $E_{\text{стац}}$ – стационарный потенциал погружения исследуемого электрода в условиях разомкнутой цепи, выдержанный в течение 10 мин.

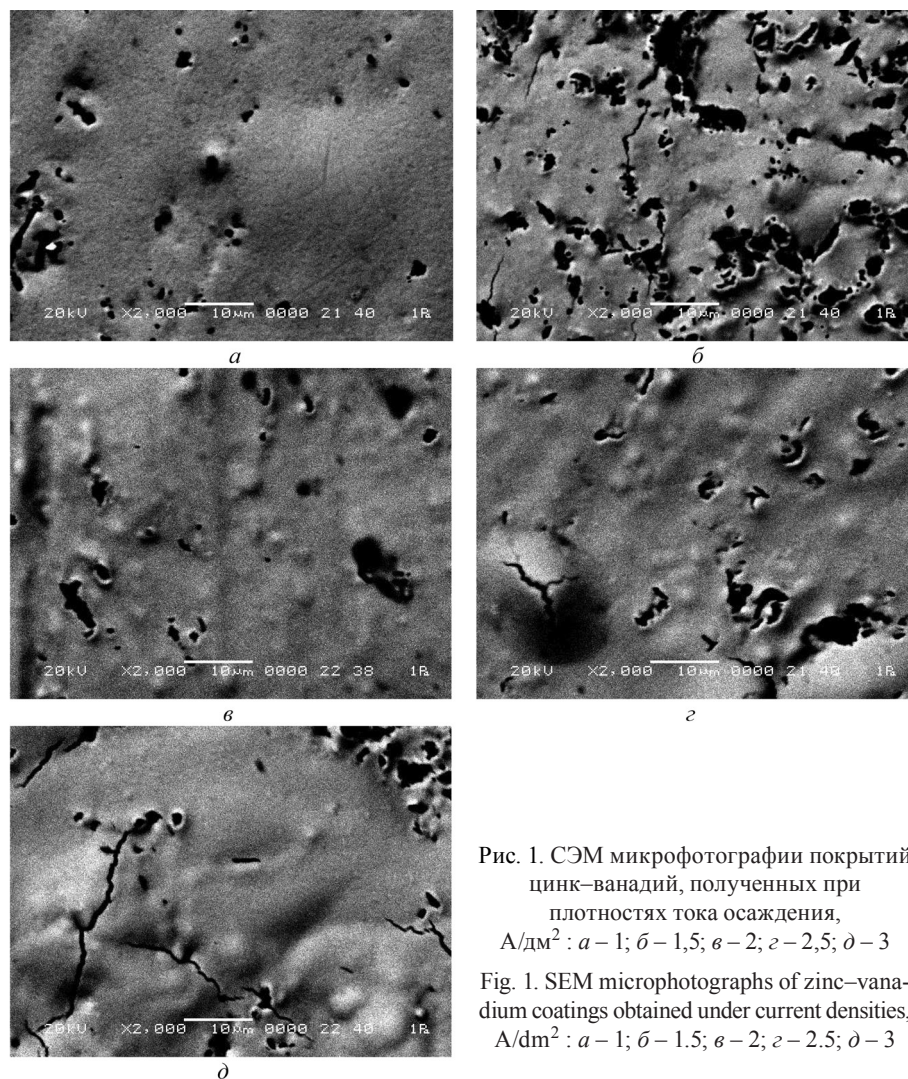


Рис. 1. СЭМ микрофотографии покрытий цинк–ванадий, полученных при плотностях тока осаждения, A/dm^2 : а – 1; б – 1,5; в – 2; г – 2,5; д – 3

Fig. 1. SEM microphotographs of zinc–vanadium coatings obtained under current densities, A/dm^2 : а – 1; б – 1.5; в – 2; г – 2.5; д – 3

Скорость коррозии получаемых покрытий определяли графически с определением плотности тока по пересечению тафелевских участков катодных и анодных поляризационных кривых, которые при необходимости экстраполировали [21]. Число проводимых параллельных опытов для всех исследований составляло от 3 до 5.

Результаты и их обсуждение. Введение ванадата натрия в раствор цинкования приводит к получению модифицированных цинковых покрытий с кристаллической структурой (рис. 1), что подтверждается данными рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 2). Покрытия являются блестящими и имеют светло-золотистый оттенок по сравнению с серовато-голубым цинковым.

При плотности тока $1 A/dm^2$ гальваническое покрытие осаждается без микротрещин (рис. 1, а), однако выход по току мал и составляет 52,31%. При плотности тока $1,5 A/dm^2$ пористость и микротрещиноватость покрытия увеличиваются (рис. 1, б). Достаточно гладкое с небольшим количеством пор легированное цинковое покрытие получается при плотности тока $2 A/dm^2$ (рис. 1, в). С увлечением плотности тока до $3 A/dm^2$ происходит уменьшение количества пор, однако увеличивается количество и размер микротрещин (рис. 1, г, д).

Выход по току сплава с увеличением плотности тока осаждения в начале увеличивается, достигая максимального значения 81,9% при $2 A/dm^2$, а затем уменьшается до 48,5% при $3 A/dm^2$, содержание ванадия в покрытии снижается с 4,1 ($1 A/dm^2$) до 1,5% ($3 A/dm^2$). Изменение содержания ванадия в покрытии не изменяет его цвет и внешний вид.

Фазовый состав легированных ванадием цинковых покрытий проанализирован с помощью РФА. На рентгенограммах легированных покрытий присутствуют пики цинка и оксида ванадия V_2O_5 (рис. 2, дифрактограммы 1 и 2).

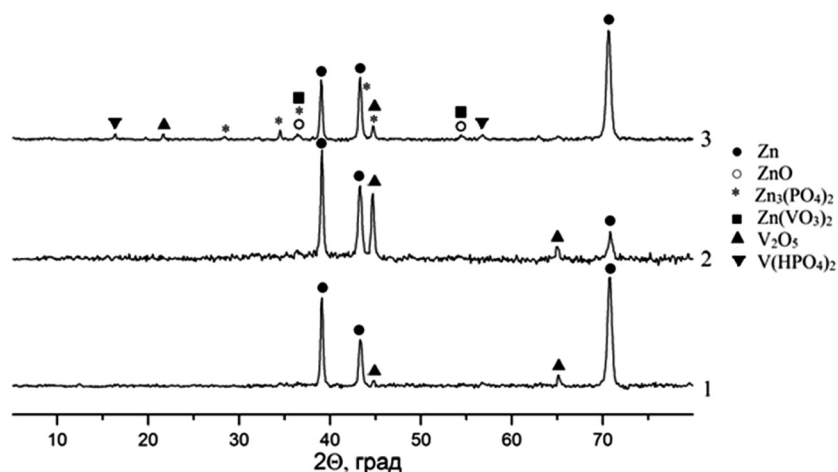


Рис. 2. Диффрактограммы легированных ванадием цинковых покрытий, полученных при плотности тока 1 (1) и 2 (2) А/дм², и пассивированного цинкового покрытия (3). Пассивация проведена в растворе 0,045 моль/дм³ Na₃VO₄, температура раствора 20 °С, время пассивации 120 с

Fig. 2. Diffractograms of vanadium-alloyed zinc coatings obtained under current densities 1 (1) and 2 (2) A/dm², and a passivated zinc coating (3). Passivation has been performed in 0.045 mol/dm³ Na₃VO₄ solution at 20°C, passivation time – 120 s

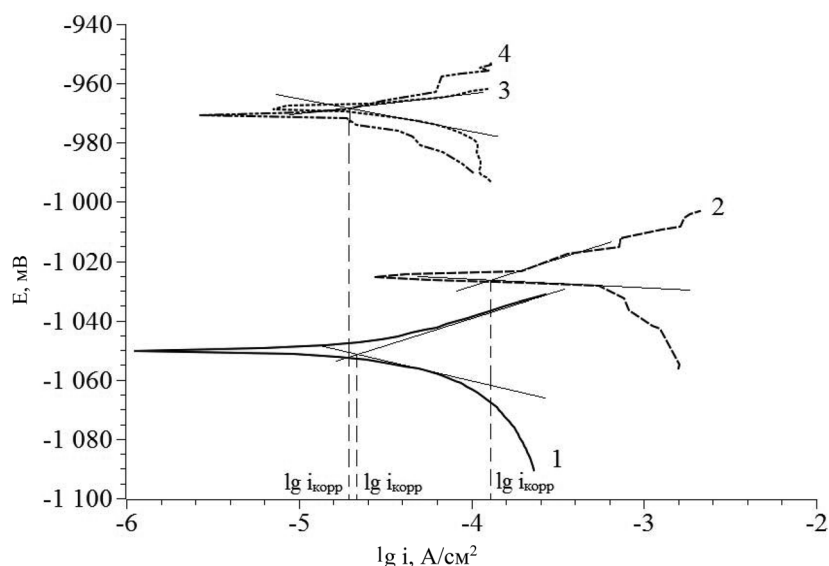


Рис. 3. Поляризационные кривые цинкового (1), непассивированного цинк–ванадиевого покрытия (2) и пассивированных цинк–ванадиевых покрытий (3, 4) в 3 %-ном растворе NaCl. Пассивация в растворе 0,03 моль/дм³ (3) и 0,045 моль/дм³ Na₃VO₄ (4). Время пассивации 120 с, температура раствора пассивации 40 °С

Fig. 3. Polarizational curves of zinc (1), non-passivated zinc–vanadium (2) and passivated zinc–vanadium (3, 4) coatings in 3% NaCl solution. Passivation has been performed in 0.03 mol/dm³ (3) and 0.045 mol/dm³ (4) Na₃VO₄ solution at 40 °C, passivation time – 120 s

На рентгенограмме пассивированного цинкового покрытия (рис. 2, диффрактограмма 3) присутствуют типичные пики цинка, а также пики следующих соединений: ZnO, V₂O₅, V(HPO₄)₂, Zn₃(PO₄)₂ и, возможно, Zn(VO₃)₂. Присутствие V₂O₅, V(HPO₄)₂ подтверждает существование соединений ванадия (IV) и (V) в конверсионных покрытиях. Наличие V(HPO₄)₂ и Zn₃(PO₄)₂ объясняется присутствием фосфорной кислоты в растворе пассивации, обеспечивающей pH 3.

Пассивация легированных ванадием цинковых покрытий в растворе с концентрацией 0,03 и 0,045 моль/дм³ ванадата натрия и температуре раствора 20 °С приводит к получению конверсионных покрытий золотистого цвета. При увеличении температуры раствора пассивации до 40 °С образуются зеленовато-золотистые конверсионные покрытия.

На рис. 3 представлены потенциодинамические поляризационные кривые для цинкового и пассивированных легированных цинковых покрытий, по которым определены токи коррозии в 3 %-ном растворе NaCl.

Минимальный ток коррозии для легированного ванадием цинкового покрытия наблюдается при плотности тока осаждения 2 А/дм^2 и составляет $125,9 \text{ мкА/см}^2$ (рис. 3, кривая 2). Цинковое покрытие из этого же электролита обладает несколько большей коррозионной стойкостью – ток коррозии составляет $33,1 \text{ мкА/см}^2$ (рис. 3, кривая 1). Потенциал коррозии составляет $-1,050 \text{ В}$ для цинкового и $-1,035 \text{ В}$ для непассивированного легированного цинкового покрытий.

Электрохимические исследования пассивированных гальванических легированных покрытий показали, что анодные и катодные поляризационные кривые сдвигаются в область меньших токов по сравнению с непассивированными покрытиями (рис. 3). Потенциалы коррозии для легированного цинкового покрытия, пассивированного в растворе $0,03 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4$, составляет $-0,971$ и $-0,974 \text{ В}$ для пассивированного в растворе $0,045 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4$, что на $60\text{--}65 \text{ мВ}$ положительнее, чем для потенциалов непассивированных покрытий. Это указывает на более высокую коррозионную стойкость пассивированных образцов по сравнению с непассивированными покрытиями.

Плотность тока коррозии пассивированных в растворе $0,03 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4$ образцов в 6 раз ниже ($21,3 \text{ мкА/см}^2$), чем у необработанных легированных цинковых покрытий, и в 5,4 раза ниже ($23,5 \text{ мкА/см}^2$) при пассивации в растворе $0,045 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4$. В таблице приведены токи коррозии в 3 %-ном растворе NaCl пассивированных легированных покрытий Zn–V (3%) при различных условиях получения пассивных пленок.

Зависимость токов коррозии пассивированных легированных покрытий Zn–V (3%) от времени пассивации и условий получения пассивных пленок

Dependence of corrosion currents in passivated alloyed Zn–V (3%) coatings on passivation time and conditions of passive film preparation

Условия пассивации	Ток коррозии, мкА/см ²						
	Время пассивации, с						
	60	120	180	240	300	420	600
$0,03 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4 \text{ } 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	63,1	55,4	26,9	24,1	20,3	19,3	17,3
$0,03 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4 \text{ } 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	36,1	20,9	21,3	25,4	27,1	27,5	10,1
$0,045 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4 \text{ } 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	54,3	32,3	20,5	21,3	20,5	23,3	18,2
$0,045 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4 \text{ } 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	36,4	23,4	23,5	33,9	11,1	15,9	27,6

Коррозионная стойкость легированных ванадием покрытий значительно повышается с увеличением времени пассивации от 60 до 180 с, а также температуры раствора. Увеличение температуры раствора пассивации от 20 до 40 °C вызывает более заметное повышение коррозионной стойкости пассивированных легированных цинковых покрытий (таблица), чем повышение концентрации ванадата натрия.

Последующее увеличение времени пассивации от 180 до 600 с при температуре раствора 20 °C и концентрации Na_3VO_4 от 0,03 и до 0,045 моль/дм³ приводит к плавному снижению тока коррозии до $17,3\text{--}18,2 \text{ мкА/см}^2$ или в 7,3–6,9 раза соответственно по сравнению с непассивированным покрытием ($125,9 \text{ мкА/см}^2$). При пассивации в $0,045 \text{ моль/дм}^3 \text{ Na}_3\text{VO}_4$ при 40 °C в течение 300 с минимальный ток коррозии $11,1 \text{ мкА/см}^2$ наблюдается для сплава Zn–V (3,0%), дальнейшее увеличение времени пассивации приводит к повышению тока коррозии до $27,6 \text{ мкА/см}^2$.

Уменьшение токов коррозии пассивированных легированных цинковых покрытий с увеличением времени пассивации, концентрации ванадата натрия и температуры раствора пассивации, возможно, связано с увеличением толщины конверсионных покрытий, что затрудняет диффузию растворенного кислорода к поверхности металла и его восстановление.

Защитные свойства пассивной пленки на цинковых покрытиях считаются удовлетворительными, если при испытаниях методом капли появление сплошного темного пятна восстановленного свинца происходит не ранее чем через 60 с. Зависимости времени выделения темного пятна свинца ($\tau_{\text{выд}}$) на пассивированных легированных цинковых покрытиях от длительности пассивации ($\tau_{\text{пасс}}$), представленные на рис. 4, свидетельствуют, что конверсионные покрытия с высокими защитными свойствами

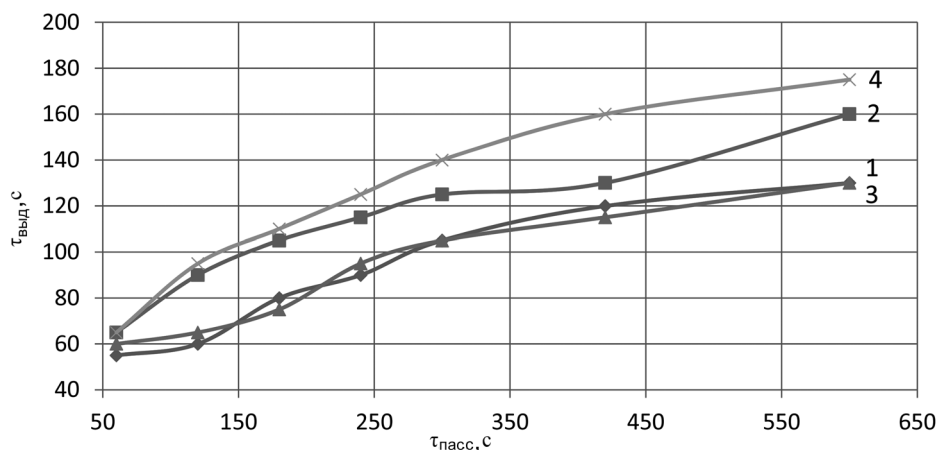


Рис 4. Защитные свойства легированных цинковых покрытий при пассивации в растворе с концентрацией 0,03 (1, 2) и 0,045 моль/дм³ Na₃VO₄ (3, 4). Температура раствора 20 (1, 3) и 40 °С (2, 4)

Fig. 4. Protective properties of alloyed zinc coatings after passivation in 0.03 mol/dm³ (1, 2) and 0.045 mol/dm³ (3, 4) Na₃VO₄ solution at 20 °С (1, 3) and 40 °С (2, 4)

получаются при времени пассивации 120 с и температуре раствора 40 °С (рис. 4, кривые 2, 4). При времени пассивации более 300 с увеличение температуры раствора незначительно повышает защитные свойства покрытий. Увеличение температуры раствора пассивации от 20 до 40 °С вызывает более заметное повышение защитных свойств пассивированных покрытий (рис. 4), чем увеличение концентрации ванадата натрия.

Заключение. В работе экспериментально показано, что из щелочного электролита цинкования с добавкой ванадата натрия можно гальванически осадить легированные ванадием (1,5–4,1%) цинковые покрытия, обладающие хорошими защитно-декоративными свойствами.

Конверсионные покрытия, полученные из раствора пассивации, содержащего ванадат натрия, повышают коррозионную стойкость легированных цинковых покрытий. Ток коррозии в 3 %-ном растворе NaCl уменьшается с 4 (время пассивации 120 с) до 5 раз (время пассивации 180 с) по сравнению с непассивированным покрытием. Защитные свойства конверсионных покрытий составляют более 60 с уже при пассивации легированного цинка в течение 60 с в растворе с 0,03 моль/дм³ Na₃VO₄ при 40 °С и в растворе 0,045 моль/дм³ Na₃VO₄ при 20 °С.

Из данных, полученных с помощью рентгенофазового анализа, следует, что конверсионные покрытия на основе ванадия представляют собой сложные системы, состоящие из соединений ванадия (IV) и (V), а также оксида цинка и фосфорсодержащих солей цинка и ванадия, которые имеют меньшую растворимость в 3 %-ном растворе NaCl по сравнению с легированным цинком и обеспечивают экранирующий механизм защиты.

Список использованных источников

1. Microstructure and micromechanical properties of electrodeposited Zn–Mo coatings on steel / H. Kazimierzczak [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 636. – P. 156–164.
2. Свойства покрытий сплавом цинк-никель, полученных из хлораммонийных электролитов / Е. В. Наливайко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2013. № 1. – С. 45–54.
3. Angles, R. M. The electrodeposition of tin-zinc alloys/ R. M. Angles // J. Electrodepositors Tech. Soc. – 2006. – Vol. 21. – P. 45–64.
4. Cuthbertson, J. W. The electrodeposition and properties of tin-zinc alloys / J. W. Cuthbertson, R. M. Angles // J. Electrodepositors Tech. Soc. – 2008. – Vol. 94. – P. 73–98.
5. Corrosion resistance of Zn–Co alloy coatings / R. Fratesi [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 1994. – Vol. 63. – P. 97–103.
6. Ariga, K. A consideration on the corrosion resistance of Zn–Co based Co-electroplated steel sheet / K. Ariga, K. Kanda // Tetsu-to-Hagane. – 1980. – Vol. 7. – P. 797–806.
7. Szczygieł, B. Microstructure and micromechanical properties of electrodeposited Zn–Mo coatings on steel. / B. Szczygieł, A. Łaszczynska, W. Tylus // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204. – P. 1438–1444.
8. Atrashkova, V. V. Electrodeposition of zinc–molybdenum coatings / V. V. Atrashkova, V. K. Atrashkov, A. A. Gerasimenko // Zashch. Met. – 2007. – Vol. 45. – P. 418–426.

9. Influence of molybdenum on properties of Zn–Ni and Zn–Co alloy coatings / P. Ozga [et al.] // Instytut Metali Niezależnych, Gliwice, 2010. (ISBN: 978-83-925546-6-0).
10. Восстановление деталей машин / В. П. Иванова [и др.]; под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
11. Corrosion behaviour of electrogalvanized steel in sodium chloride and ammonium sulphate solutions / L. Fedrizzi [et al.] // J. Appl. Electrochem. – 1992. – Vol. 22. – P. 247–254.
12. Liu, D. Synthesis and evaluation of corrosion resistance of molybdate-based conversion coatings on electroplated zinc / D. Liu, Z. Yang, Z. Wang // Surface & Coatings Technology. – 2010. – Vol. 205. – P. 2328–2334.
13. Magalhães, A. A. O. Molybdate conversion coatings on zinc surfaces / A. A. O. Magalhães, I. C. P. Margarit, O. R. Mattos // J. Electroanal. Chem. – 2004. – Vol. 572. – P. 433–440.
14. Fachikov, L. MoO_4^{2-} as a soluble inhibitor for Zn in neutral and alkaline solutions / L. Fachikov, D. Ivanova // Appl. Surf. Sci. – 2012. – Vol. 258. – P. 10160–10167.
15. Synthesis and evaluation of corrosion resistance of molybdate-based conversion coatings on electroplated zinc / V. Dikinis [et al.] // Trans. Inst. Met. Finish. – 2007. – Vol. 85. – P. 87–93.
16. Corrosion resistance of chromium-free conversion coatings deposited on electrogalvanized steel from potassium hexafluorotitanate (IV) containing bath / Y. W. Song [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204. – P. 3182–3187.
17. Guan, H. Corrosion Protection of Aluminum Alloy 2024-T3 by Vanadate Conversion Coatings / H. Guan, R. G. Buchheit // Corrosion. – 2004. – Vol. 60, N 3. – P. 285–296.
18. Hamdy, A. S. A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates / A. S. Hamdy, A. M. Beccaria // Corros. Prevent. Control. – 2001. – Vol. 48. – P. 143–149.
19. A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates / Z. Zou [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 503–507.
20. Wang, P. Structure and water-barrier properties of vanadate-based corrosion inhibitor films / P. Wang, X. Dong, W. Schaefer // Corros. Sci. – 2010. – Vol. 52. – P. 943–949.
21. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов, Г. М. Флорианович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – С. 45–56.

References

1. Kazmierczak H., Ozga P., Berent K., Kot M., “Microstructure and micromechanical properties of electrodeposited Zn–Mo coatings on steel”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 636, pp. 156–164.
2. Nalivaiko E. V., Gorovaia E. Iu., Bobrikova I. G., Selivanov V. N., “Properties of zinc-nickel alloy coatings obtained from ammonium chloride electrolytes”, *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2013, no. 1, pp. 45–54.
3. Angles R. M., “The electrodeposition of tin-zinc alloys”, *Journal of the Electrodepositors’ Technical Society*, 2006, vol. 21, pp. 45–64.
4. Cuthbertson J. W., Angles R. M., “The electrodeposition and properties of tin-zinc alloys”, *Journal of the Electrodepositors’ Technical Society*, 2008, vol. 94, pp. 73–98.
5. Fratesi R., Roventi G., Branca C., Simoncini S., “Corrosion resistance of Zn–Co alloy coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 1994, vol. 63, pp. 97–103.
6. Ariga K., Kanda K., “A consideration on the corrosion resistance of Zn–Co based Co-electrogalvanized steel sheet”, *Tetsu-to-Hagane*, 1980, vol. 7, pp. 797–806.
7. Szczygieł B., Laszczyńska A., Tylus W., “Microstructure and micromechanical properties of electrodeposited Zn–Mo coatings on steel”, *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 204, pp. 1438–1444.
8. Atrashkova V. V., Atrashkov V. K., Gerasimenko A. A., “Electrodeposition of zinc–molybdenum coatings”, *Zashchita metallov* [Protection of metals], 1995, no. 3, pp. 313–314.
9. Ozga P., Swiatek Z., Debski A., *Influence of molybdenum on properties of Zn–Ni and Zn–Co alloy coatings*, Instytut Metali Niezależnych, Gliwice, PL, 2010.
10. Ivanova V. P., Panteleenko F. I., *Vosstanovlenie detalei mashin* [Reconstruction of machine parts], in Ivanov V. P. (ed.), Mashinostroenie, Moscow, RU, 2003.
11. Fedrizzi L., Ciaghi L., Bonora P.L., Fratesi R., Roventi G., “Corrosion behaviour of electrogalvanized steel in sodium chloride and ammonium sulphate solutions”, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1992, vol. 22, pp. 247–254.
12. Liu D., Yang Z., Wang Z., “Synthesis and evaluation of corrosion resistance of molybdate-based conversion coatings on electroplated zinc”, *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, pp. 2328–2334.
13. Magalhães A. A. O., Margarit I. C. P., Mattos O. R., “Molybdate conversion coatings on zinc surfaces”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2004, vol. 572, pp. 433–440.
14. Fachikov L., Ivanova D., “ MoO_4^{2-} as a soluble inhibitor for Zn in neutral and alkaline solutions”, *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258, pp. 10160–10167.
15. Dikinis V., Niaura G., Rėzaitė V., Demčenko I., “Synthesis and evaluation of corrosion resistance of molybdate-based conversion coatings on electroplated zinc”, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2007, vol. 85, pp. 87–93.
16. Song Y. W., Shan D. Y., Chen R. S., Han E. H., “Corrosion resistance of chromium-free conversion coatings deposited on electrogalvanized steel from potassium hexafluorotitanate(IV) containing bath”, *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 204, pp. 3182–3187.

17. Guan H., Buchheit R. G., “Corrosion Protection of Aluminum Alloy 2024-T3 by Vanadate Conversion Coatings”, *Corrosion*, 2004, vol. 60, no. 3, pp. 285–296.
18. Hamdy A. S., Beccaria A. M., “A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates”, *Corrosion Prevention and Control*, 2001, vol. 48, pp. 143–149.
19. Zou Z., Li N., Li D., Liu H., Mu S., “A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 503–507.
20. Wang P., Dong X., Schaefer W., “Structure and water-barrier properties of vanadate-based corrosion inhibitor films”, *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, pp. 943–949.
21. Semenova I. V., Khoroshilov A. V., Florianovich G. M., *Korroziia i zashchita ot korrozii* [Corrosion and corrosion protection], FIZMATLIT, Moscow, RU, 2002.

Информация об авторах

Акулич Надежда Евгеньевна – аспирант, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akulitch.nadejda@yandex.ru.

Жарский Иван Михайлович – канд. хим. наук, профессор, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: root@belstu.by.

Иванова Наталья Петровна – канд. хим. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nataliaivanova1@rambler.ru.

Information about the authors

Nadejda E. Akulich – Postgraduate student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akulitch.nadejda@yandex.ru.

Ivan M. Zharsky – Ph. D. (Chemistry), Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: root@belstu.by.

Natalia P. Ivanova – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nataliaivanova1@rambler.ru.