ISSN 1561-8331(print.)

НЕАРГАНІЧНАЯ ХІМІЯ

INORGANIC CHEMISTRY

УДК 620.197.3:620.193:621.357.7

Поступила в редакцию 20.02.2017
Receiver 20.02.2017

М. М. Борзых, Н. Е. Акулич, В. Г. Матыс, Н. П. Иванова, И. Н. Кандидатова, В. А. Ашуйко

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

ИНГИБИТОРНАЯ ЗАЩИТА ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ ВАНАДАТОМ НАТРИЯ

Аннотация: Описаны результаты исследования способа защиты гальванических цинковых покрытий в нейтральной хлоридсодержащей среде растворимым ингибитором коррозии ванадатом натрия Na_3VO_4. Исследования ингибиторной защиты гальванически оцинкованной стали Na_3VO_4 были проведены весовым и электрохимическим методами. Исследования проводили в 3%-ном растворе хлорида натрия в диапазоне концентраций ингибитора 0,0005–0,0003 М. Были определены массовые показатели коррозии, плотности тока и потенциалы коррозии оцинкованной стали в зависимости от концентрации ингибитора. Электрохимические исследования показывают, что введение в коррозионную среду (3% NaCl) в качестве ингибитора ванадата Na_3VO_4 в количествах 0,00005–0,0003 М замедляет процесс коррозии цинка. Процесс коррозии замедляется в 3,3 раза при концентрации ингибитора 0,00005 М, и в 20 раз при концентрации ингибитора 0,0002 М соответственно. Увеличение концентрации ванадата натрия более 0,0002 М нецелесообразно, так как происходит увеличение тока коррозии. На основании двух независимых методов исследования ингибиторной защиты оцинкованной стали ванадатом Na_3VO_4 можно сделать вывод, что оптимальная концентрация ингибитора коррозии Na_3VO_4 в 3%-ном растворе NaCl лежит в диапазоне 0,0001–0,0002 М. При этом защитный эффект ингибитора, определенный весовым методом, составляет 40–76%, а электрохимическим – 93–95%.

Ключевые слова: ингибиторная защита, цинкование, цинковые покрытия, ванадат натрия

Для цитирования: Ингибиторная защита оцинкованной стали ванадатом натрия / М. М. Борзых [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 3. – С. 22–28.

M. M. Borzyh, N. E. Akulich, V. G. Matys, N. P. Ivanova, I. N. Kandidatova, V. A. Ashuiko

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

CORROSION INHIBITION OF Zn-PLATED STEEL BY SODIUM VANADATE

Abstract: The results of investigation of corrosion inhibition of zinc-plated coatings in neutral chloride-containing corrosive medium by aqueous sodium vanadate solution are described. Investigations of corrosion inhibition of zinc-plated coatings on steel were performed by gravimetric and electrochemical method. The corrosive medium was neutral 3% sodium chloride solution, with a sodium vanadate concentration varied from 0.00005 M to 0.0003 M. Mass indices of corrosion, current density and corrosion potential of galvanized steel were determined depending on inhibitor concentration. Electrochemical studies show that the introduction of sodium vanadate in amounts of 0.00005–0.0003 M into the corrosive medium (3% sodium chloride solution) slows down the process of zinc corrosion. The corrosion process slows down by 3.3 times at an inhibitor concentration of 0.00005 M and by 20 times at an inhibitor concentration of 0.0002 M, respectively. An increase in the concentration of sodium vanadate to more than 0.0002 M is inappropriate, since an increase in the corrosion current occurs. The optimal corrosion inhibitor concentration for zinc-plated steel in 3% NaCl solution for Na_3VO_4 lies in the range of 0.0001–0.0002 M. The protection effect of the inhibitor found by gravimetric and electrochemical methods equals to 40–76% and 93–95%, respectively.

Keywords: corrosion inhibition, zinc-plating, zinc coatings, sodium vanadate

For citation: Borzyh M. M., Akulich N. E., Matys V. G., Ivanova N. P., Kandidatova I. N., Ashuiko V. A. Corrosion inhibition of Zn-plated steel by sodium vanadate. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk.* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series], 2017, no. 3, pp. 22–28 (In Russian).

Введение. Основное назначение цинковых покрытий – защита углеродистой и низколегированной стали от коррозии. Длительность защиты покрываемых изделий от коррозионного разрушения определяется коррозионной стойкостью самих покрытий. Вопросам повышения коррозионной стойкости цинковых покрытий в последнее время уделяется повышенное внимание со стороны разработчиков и потребителей процессов цинкования. При использовании оцинко-

ванных изделий в замкнутых коррозионных средах необходима ингибиторная защита. Для ингибиторной защиты алюминиевых сплавов используются ванадаты. При этом для цинксодержащих сплавов алюминия (таких как AA7075) актуально исследование ингибиторной защиты цинка, который является коррозионно нестойким компонентом таких сплавов [1, 2]. Ванадийсодержащие конверсионные покрытия на цинке исследовались ранее как альтернатива хроматным пассивационным покрытиям для гальванических цинковых покрытий [3]. При этом механизм ингибирующего действия ванадатов на цинк еще недостаточно выяснен. В работе [1] отмечается, что ванадаты замедляют как катодную реакцию восстановления кислорода, так и анодную реакцию растворения цинка в 0,1 М NaCl. При длительной выдержке цинка в растворе NaCl в присутствии $NaVO_3$ на поверхности возможно образование адсорбированных поливанадатов, в то время как при недлительной выдержке происходит стабилизация пассивационных пленок состава $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$, формируемых на поверхности цинка в водном растворе NaCl [1]. Исследования пассивационных пленок, полученных на поверхности цинка из ванадатных растворов, методом электронно-зондового энергодисперсного локального химического анализа указывают на содержание в их составе оксидов ванадия V_2O_5, VO_2 или их гидратов $V_2O_5 \cdot nH_2O$ и $VO(OH)_2$ [2].

Цель работы – исследование ингибиторной защиты гальванических цинковых покрытий в нейтральной хлоридсодержащей среде ванадатом натрия Na_3VO_4 весовым и электрохимическим методами.

Методика эксперимента. Объектами исследования служили гальванические цинковые покрытия на углеродистой стали 08кп. Цинковые покрытия наносили электрохимическим способом на зачищенные наждачной бумагой и обезжиренные ацетоном стальные пластины из листовой углеродистой стали марки 08кп размером 20×20 мм. Для осаждения покрытий использовали процесс слабокислого цинкования ЛГ–50 [4]. Состав используемого электролита (рабочий диапазон значений pH 5,0–5,5): $ZnCl_2$ (80 г/л), NH_4Cl (205 г/л), блескообразователь «ЛГ–50А» (40 г/л), блескообразователь «ЛГ–50Б» (0,85 г/л).

Процесс осаждения цинка проводили при температуре 21±2°С с цинковыми анодами марки Ц0. Покрытия наносили при плотности тока 2 А/дм^2 в один слой толщинами 9 мкм для снятия поляризационных кривых и 18 мкм для определения массового показателя коррозии. Пассивацию цинковых покрытий не проводили.

Коррозионные испытания проводили в 3%-ном растворе NaCl в присутствии ванадата натрия с концентрацией $(0{,}5–3)\times10^{-4}$ М. Водородный показатель pH этих растворов находился в пределах 7,5–7,7 (pH доводили с требуемого значения с помощью HCl). Ингибитор коррозии Na_3VO_4 синтезировали с применением 20%-ного раствора NaOH и V_2O_5. Для приготовления 0,1 М раствора ванадата Na_3VO_4 навеску оксида V_2O_5 массой 1,82 г растворили в 100 мл 20%-ного раствора NaOH. Полученный раствор ингибитора использовали в качестве исходного при приготовлении рабочих растворов для исследования ингибиторной защиты.

Коррозионные испытания весовым методом проводили в течение 24–96 ч. Для определения потерь массы образцы взвешивали на аналитических весах марки Ohaus PA 13 C с точностью ±0,001 г. Для определения массового показателя коррозии предварительно взвешенные образцы оцинкованной стали (4 шт.) с толщиной покрытия 18 мкм погружали на подвесках в химические стаканы с 3%-ным раствором NaCl, содержащим ингибитор. Каждые 24 ч один образец извлекали из раствора, промывали водой и удаляли продукты коррозии в растворе $(NH_4)_2S_2O_8$ с концентрацией 100 г/л в течение 5 мин при комнатной температуре [5]. Затем образец снова промывали водой, сушили фильтровальной бумагой и на воздухе в течение 5–10 мин и взвешивали. Массовый показатель коррозии K_m (г·м$^{-2}$·ч$^{-1}$) рассчитывали на основе изменения массы образца по формуле:

$$K_m = \Delta m / S \cdot \tau, \quad (1)$$

где Δm – изменение массы образца, г; S – площадь поверхности коррозии, м^2; τ – время испытаний, ч. В ходе испытаний измеряли также стационарный потенциал оцинкованных образцов относительно хлорсеребряного электрода сравнения.

Коррозионную стойкость цинковых покрытий исследовали также электрохимическим методом путем снятия анодных и катодных поляризационных кривых с использованием потенциостата IPC-PRO M, подключенного к персональному компьютеру с программным обеспечением «IPC2000». Потенциостатические поляризационные кривые снимали в стандартной трехэлектродной электрохимической ячейке ЯСЭ-2 с платиновым вспомогательным электродом и хлорсеребряным электродом сравнения. После погружения образца в раствор его выдерживали в течение 5–7 мин для определения величины бестокового потенциала. После установления потенциала снимали катодную поляризационную кривую в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с. При этом потенциал смещали на 200±50 мВ от бестокового потенциала в катодную сторону. Далее образец находился в растворе до установления значения бестокового потенциала, после чего снимали анодную кривую со смещением на +100 мВ от бестокового потенциала в анодную сторону. Для каждого опыта использовали свежий раствор. Число параллельных опытов составляло 2–4.

На основании массового показателя коррозии и плотности тока коррозии были рассчитаны значения защитного эффекта ингибитора Z:

$$Z = (K_{м,0} - K_м) / K_{м,0} = (i_{кор,0} - i_{кор}) / i_{кор,0}, \quad (2)$$

где $K_{м,0}$ и $K_м$ – скорость растворения металла в среде без ингибитора и с ингибитором соответственно, г/(м^2·ч); $i_{кор,0}$ и $i_{кор}$ – плотность тока коррозии металла в среде без ингибитора и с ингибитором соответственно, мкА/см^2.

Результаты и их обсуждение. Были получены фотографии исходного образца и образцов после проведения коррозионных испытаний в течение 96 ч в 3%-ном растворе NaCl без и с добавлением ванадата натрия различной концентрации. Осмотр образцов показал, что уже после 24 ч испытаний на поверхности покрытия образуются темно-серые и белые точечные скопления, полосы и разводы продуктов коррозии цинка (так называемая «белая коррозия»). С течением времени площадь, занимаемая ими, увеличивалась. Наименьшие коррозионные повреждения после 96 ч испытаний отмечались при концентрациях ванадата Na_3VO_4 0,0001 М и 0,0002 М, в то время как при концентрации 0,0003 М коррозионные повреждения были даже более сильными, чем в отсутствие ингибитора.

В 3%-ном растворе NaCl величина электродного потенциала цинка принимает значение ~ 1 В относительно насыщенного хлорсеребряного электрода. На временных зависимостях потенциала при всех исследованных концентрациях ингибитора достаточно четко прослеживается минимум при значении времени после начала испытаний 20–30 ч (рис. 1, *а*). При этом стационарный потенциал образцов снижается на ~ 25–30 мВ. Снижение стационарного потенциала цинка в первые часы воздействия 0,1 М раствора NaCl с добавкой 0,0025 М $NaVO_3$ ранее отмечалось в работе [1]. Смещение стационарного потенциала в катодную сторону можно связать с активацией поверхности в первые 30 ч коррозионных испытаний. Далее потенциал постепенно смещается в анодную область и после 96 ч коррозионных испытаний оказывается на 10–50 мВ более положительным, чем в начале испытаний. Смещение потенциала образцов в анодную область может быть связано с пассивацией поверхности. Таким образом, после 96 ч испытаний на поверхности цинка начинают преобладать процессы, приводящие к пассивации поверхности, в результате чего потенциал смещается в анодную область.

На рис. 1, *б* представлена временная зависимость весового показателя коррозии цинкового покрытия в 3%-ном растворе NaCl без и с ингибитором коррозии Na_3VO_4. После 55–60 ч испытаний значение весового показателя коррозии в коррозионной среде, содержащей 0,00005 М и 0,0003 М Na_3VO_4, становится больше, чем в среде без ингибитора, который в данном случае может являться активатором поверхности.

На рис. 2 представлена зависимость весового показателя коррозии цинка от концентрации ингибитора в коррозионной среде. Из данной зависимости можно сделать вывод, что оптимальная концентрация ингибитора Na_3VO_4 составляет 0,0001–0,0002 М.

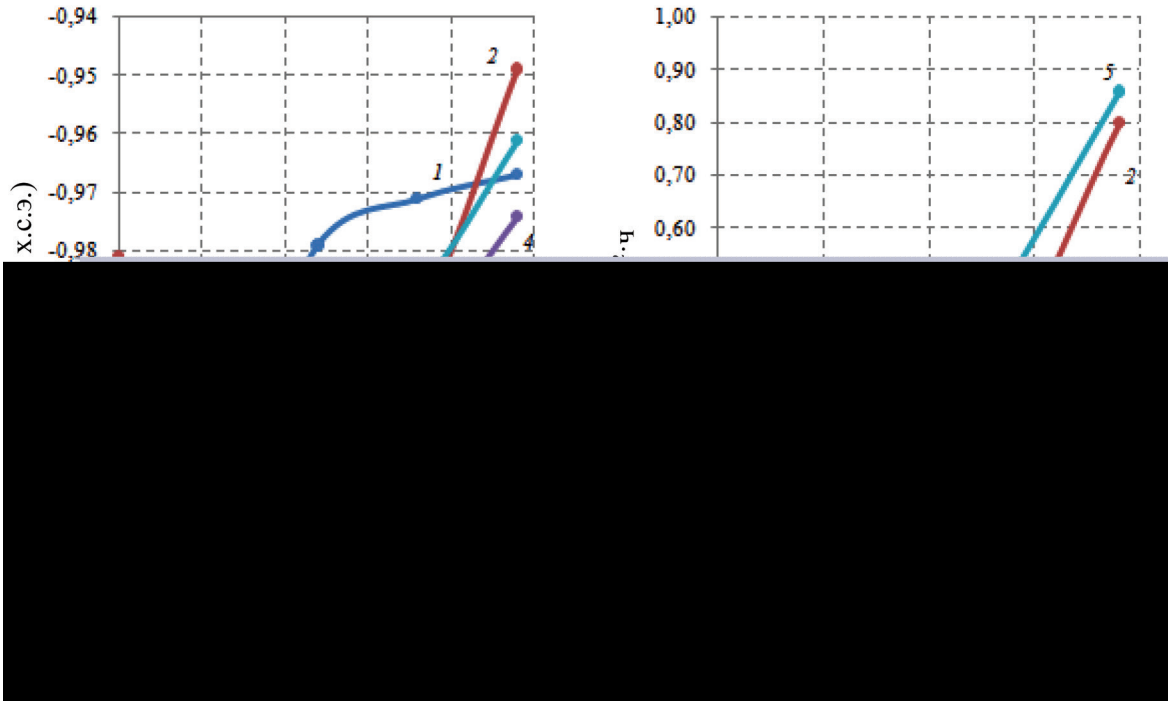

Рис. 1. Временная зависимость потенциала оцинкованной стали (*а*) и массового показателя коррозии цинкового покрытия (*б*) в растворе 3% NaCl без ингибитора (*1*) и с ингибитором Na_3VO_4 (*2–5*) в различных концентрациях: *2* – 0,00005 М; *3* – 0,0001 М; *4* – 0,0002 М; *5* – 0,0003 М

Fig. 1. Potential of zinc-plated steel *(a)* and gravimetric corrosion coefficient of zinc coating *(б)* versus time in 3% NaCl solution without inhibitor (*1*) and in presence of Na_3VO_4 inhibitor at different concentrations (*2–5*): *2* – 0.00005 M; *3* – 0.0001 M; *4* – 0.0002 M; *5* – 0.0003 M

Анализ значений показателя коррозии (рис. 2) в зависимости от концентрации Na_3VO_4 и времени испытаний позволил сделать следующие выводы: с увеличением времени испытаний более 70 ч скорость коррозии возрастает как в присутствии ингибитора, так и без него; наименьшая скорость коррозии и наибольший защитный эффект ингибитора отмечался при концентрациях ванадата натрия Na_3VO_4 0,0001 и 0,0002 М; при концентрациях Na_3VO_4 0,00005 и 0,0003 М и длительном времени испытаний 72 и 96 ч скорость коррозии увеличивается.

На рис. 3 показаны поляризационные кривые в 3%-ном растворе NaCl без ингибитора и с ингибитором Na_3VO_4. Ток и потенциал коррозии определяли по пересечению прямолинейных участков тафелевских поляризационных кривых, которые при необходимости экстраполировали. Определенные таким образом значения потенциалов и плотностей тока коррозии усредняли по результатам параллельных опытов. Средние значения представлены в табл. 1.

Рис. 2. Зависимость весового показателя коррозии от концентрации ингибитора в 3%-ном растворе NaCl при 24 ч, 48, 72 и 96 ч испытаний

Fig. 2. Gravimetric corrosion coefficient versus inhibitor concentration in 3% NaCl solution after 24 h, 48, 72 and 96 h of testing

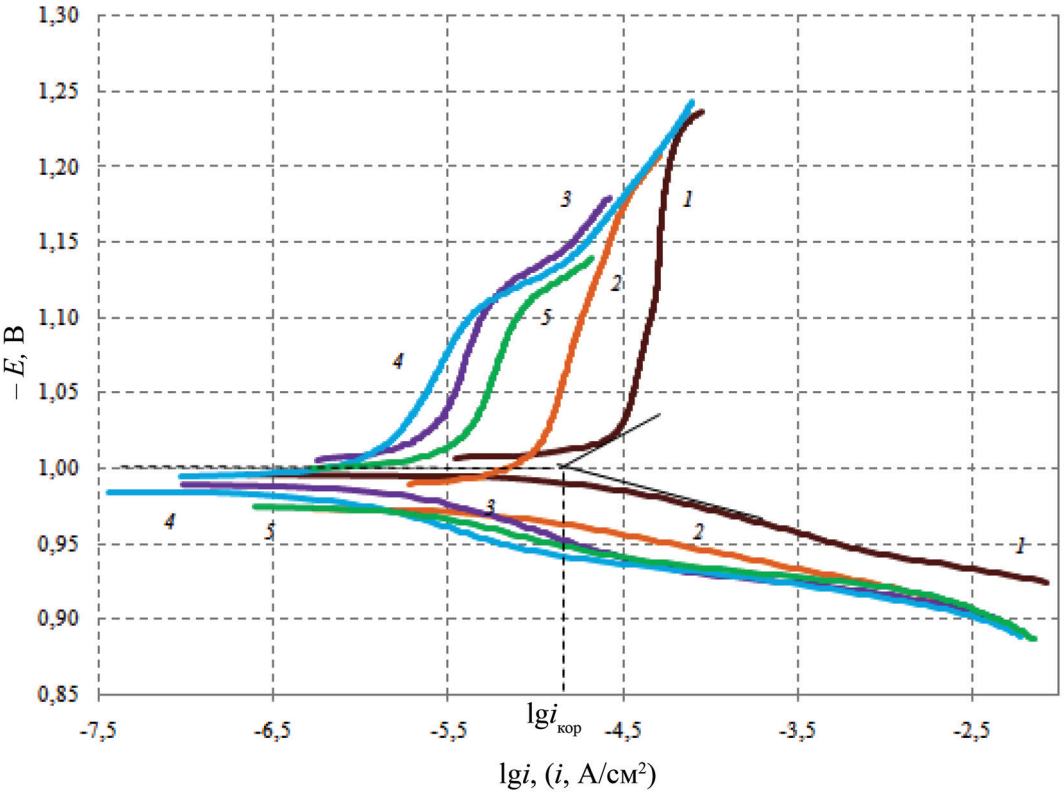

Рис. 3. Поляризационные кривые в 3%-ном растворе NaCl без (*1*) и с ингибитором Na_3VO_4 (*2–5*) в различных концентрациях: 2 – 0,00005 М; 3 – 0,0001 М; 4 – 0,0002 М; 5 – 0,0003 М

Fig. 3. Polarization curves in 3% NaCl solution without inhibitor (*1*) and in presence of Na_3VO_4 inhibitor at different concentrations (*2–5*): *2* – 0.00005 M; *3* – 0.0001 M; *4* – 0.0002 M; *5* – 0.0003 M

Таблица 1. **Значения потенциала $E_{кор}$ и тока коррозии $i_{кор}$ цинкового покрытия в зависимости от состава раствора**

Table 1. **Corrosion potential E_{cor} and corrosion current i_{cor} of zinc-plated coating depending on the solution composition**

Состав раствора	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, мкА/см^2
3%-ный NaCl	–1,00	10,77
3%-ный NaCl + 0,00005 М Na_3VO_4	–0,98	3,27
3%-ный NaCl + 0,0001 М Na_3VO_4	–0,99	0,70
3%-ный NaCl + 0,0002 М Na_3VO_4	–0,99	0,53
3%-ный NaCl + 0,0003 М Na_3VO_4	–0,98	0,73

С введением в 3%-ный раствор NaCl ванадата Na_3VO_4 коррозионный потенциал цинка изменяется незначительно, сдвигаясь в электроположительную сторону на ~ 20 мВ.

На рис. 4 показана зависимость тока коррозии цинковых покрытий в 3%-ном растворе NaCl, содержащем ингибитор коррозии Na_3VO_4. Электрохимический метод четко показывает защитный эффект ванадата натрия при всех концентрациях. Плотность тока коррозии характеризует начальную скорость коррозии и потому качественно согласуется с характером изменения массового показателя коррозии при самом малом времени испытаний, которое составляло 24 ч (рис. 1, *б*). Защитный эффект ингибитора, определенный по токам коррозии, составляет более 90% (табл. 2) при концентрациях Na_3VO_4 0,0001 М и более, в то время как рассчитанный на основании весовых измерений максимальный защитный эффект наблюдался при концентрации ингибитора 0,0001 М и времени испытаний 24 ч и составлял ~75%.

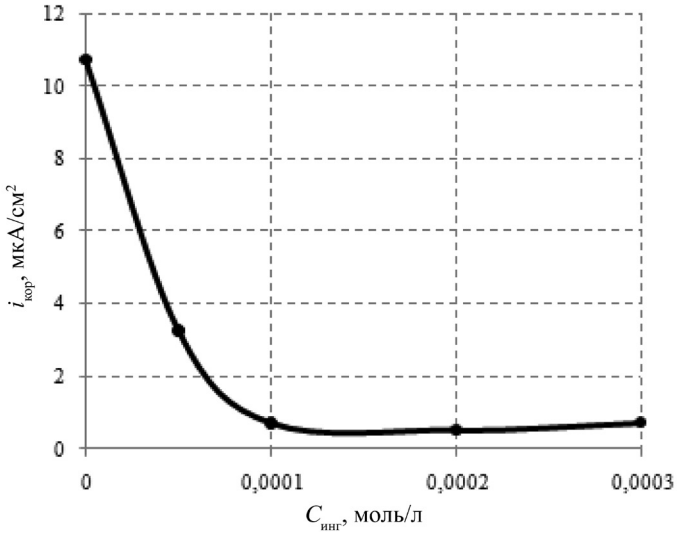

Рис. 4. Зависимость тока коррозии цинковых покрытий в 3%-ном растворе NaCl, содержащем ингибитор коррозии Na_3VO_4

Fig. 4. Corrosion currents of zinc coatings in 3% NaCl solution containig Na_3VO_4 corrosion inhibitor

Таблица 2. **Показатели коррозии оцинкованной стали и защитный эффект *Z* ингибитора Na_3VO_4 в 3%-ном растворе NaCl**

Table 2. **Corrosion coefficients of zinc-plated steel and protection effect Z of Na_3VO_4 inhibitor in 3% NaCl solution**

Содержание Na_3VO_4, моль/л	Весовой метод (24 ч)		Электрохимический метод	
	$K_м$, г/(м^2·ч)	*Z*, %	$i_{кор}$, мкА/см^2	*Z*, %
0,00005	0,31	29,4	3,27	69,7
0,0001	0,10	76,5	0,70	93,5
0,0002	0,26	41,2	0,53	95,1
0,0003	0,42	5,88	0,73	93,2

Таким образом, электрохимические исследования показывают, что при введении в коррозионную среду (3%-ный NaCl) в качестве ингибитора ванадата Na_3VO_4 в количествах 0,00005–0,0003 М процесс коррозии цинка замедляется в 3,3 раза при концентрации 0,00005 М, в 20 раз при концентрации 0,0002 М. Увеличение концентрации ингибитора ванадата натрия более 0,0002 М нецелесообразно, так как происходит увеличение тока коррозии.

На основании двух независимых методов исследования ингибиторной защиты цинка можно сделать вывод, что оптимальная концентрация ингибитора коррозии Na_3VO_4 в 3%-ном растворе NaCl составляет 0,0002 М.

Заключение. Проведены исследования ингибиторной защиты гальванически оцинкованной стали растворимым ингибитором Na_3VO_4 весовым и электрохимическим методами в 3%-ном растворе NaCl в диапазоне концентраций ингибитора 0,0005–0,0003 М. Определены массовые показатели коррозии, плотности тока и потенциалы коррозии оцинкованной стали в зависимости от концентрации ингибитора.

На основании двух независимых методов исследования ингибиторной защиты оцинкованной стали ванадатом Na_3VO_4 можно сделать вывод, что оптимальная концентрация ингибитора коррозии Na_3VO_4 в 3%-ном растворе NaCl лежит в диапазоне 0,0001–0,0002 М. При этом защитный эффект ингибитора, определенный весовым методом, составляет 40–76%, а электрохимическим – 93–95%.

Благодарности. Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на конференции «Молодежь в науке – 2016», 22–25 ноября 2016 г.

Acknowledgements. This article is based on the materials presented at the conference «Youth in science – 2016», November 22–25th, 2016.

Список использованных источников

1. Hurley, B. L. Corrosion Inhibition of Zinc by Aqueous Vanadate Species / / B. L. Hurley, K. D. Ralston, R. G. Buchheita / J. Electrochem. Soc. – 2014. – Vol. 161, N10. – P. C471–C475.

2. Li, Ning Corrosion protection properties of vanadium films formed on zinc surfaces / Ning Li / Rare Metals. – 2011. – Vol. 30, N 2. – P. 146.

3. Zou, Zhongli. A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates / Zhongli Zou, Ning Li, Deyu Li, Haiping Liu, Songlin Mu / J. All. Compd. – 2011. – Vol. 509. – P. 503–507.

4. Процесс слабокислого цинкования – chimsn.ru [Электронный ресурс]. ООО «Химсинтез». 2014. URL: http://chimsn.ru/bleskoobrazovateli-dlya-galvanotehniki/process-slabokislogo-cinkovaniya/ (дата обращения: 25.09.2016).

5. ГОСТ Р 9.907-2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. [Текст]. – Введ. 2009–01–01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 16 с.

References

1. Hurley B. L., Ralston K. D., Buchheita R. G., “Corrosion Inhibition of Zinc by Aqueous Vanadate Species”, *Journal of The Electrochemical Society*, 2014, vol. 161, no. 10, pp. C471–C475.

2. Li Ning, “Corrosion protection properties of vanadium films formed on zinc surfaces”, *Rare Metals*, 2011, vol. 30, no. 2, p. 146.

3. Zou Zhongli, Li Ning, Li Deyu, Liu Haiping, Mu Songlin, “A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 503–507.

4. “The process of weak acid zinc plating”, 2014, available at: http://chimsn.ru/bleskoobrazovateli-dlya-galvanotehniki/process-slabokislogo-cinkovaniya/, (Accessed 25.09.2016).

5. Limited Liability Company “Protector”, Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry im. Frumkin Russian Academy of Sciences, *GOST R 9.907-2007. Edinaia sistema zashchity ot korrozii i stareniia. Metally, splavy, pokrytiia metallicheskie. Metody udaleniia produktov korrozii posle korrozionnykh ispytanii* [GOST R 9.907-2007. Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metal coatings. Methods for removing corrosion products after corrosion testing], Standartinform, Moscow, RU, 2007.

Информация об авторах

Борзых Мария Михайловна – выпускница, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vmatys@belstu.by.

Акулич Надежда Евгеньевна – магистр техн. наук, аспирант, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhpk.n@yandex.ru.

Матыс Владимир Генрихович – канд. хим. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vmatys@belstu.by.

Иванова Наталья Петровна – канд. хим. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ivanova@belstu.by.

Кандидатова Ирина Николаевна – канд. хим. наук, ассистент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kandidatova@belstu.by.

Ашуйко Валерий Аркадьевич – канд. хим. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ashuiko@belstu.by.

Information about the authors

Mariya M. Borzyh – Graduate, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vmatys@belstu.by.

Nadejda E. Akulich – M. Sc. (Engineering), Ph. D. student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhpk.n@yandex.ru.

Vladimir G. Matys – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vmatys@belstu.by.

Natal’ya P. Ivanova – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivanova@belstu.by.

Irina N. Kandidatova – Ph. D. (Chemistry), Assistant Lecturer, Belarusian State Technological University (13a Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kandidatova@belstu.by.

Valerii A. Ashuiko – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ashuiko@belstu.by.