

## ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ЦИНКА ИЗ КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА СТАЛЬНУЮ ПОДЛОЖКУ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННУЮ, В ПОТЕНЦИОСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ДОФАЗОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

И.С. Панкратов, С.Ю. Почкина, Н.Д. Соловьева, Т.Ю. Ялымова

Илья Сергеевич Панкратов (ORCID 0000-0002-1171-0775)\*

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, ул. Политехническая, 77, Саратов, Российская Федерация, 410054  
E-mail: ilya.wolf765@yandex.ru \*

Светлана Юрьевна Почкина (ORCID 0000-0001-6856-0029), Нина Дмитриевна Соловьева (ORCID 0000-0002-0421-9347), Татьяна Юрьевна Ялымова (ORCID 0000-0001-5620-6778)

Кафедра технологии и оборудования химических, нефтегазовых, пищевых производств, Энгельсский технологический институт, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, пл. Свободы, 17, Энгельс, Российская Федерация, 413100  
E-mail: tepeti@mail.ru

*Исследовано влияние предварительной обработки стальной поверхности изделия в потенциостатическом режиме дофазового осаждения на процесс электроосаждения цинка из кислых электролитов. С целью определения потенциала поляризации в режиме дофазового осаждения измерялся равновесный потенциал цинкового электрода в растворах изучаемых составов. Предварительная обработка исходного стального электрода (использовалась Ст3) в потенциостатическом режиме дофазового осаждения осуществлялась при потенциалах на 50 мВ положительнее равновесного значения. Показано, что содержание цинка в поверхностном слое стального электрода, определенное рентгенофлуоресцентным методом, зависит от времени поляризации в режиме дофазового осаждения и состава электролита. Установлена длительность времени дофазовой поляризации электрода, не превышающая 3 мин. Увеличение времени поляризации нецелесообразно, так как в результате частичного растворения осаждаемого цинка, его количество в поверхностном слое не возрастает. Изучение кинетики дофазового осаждения цинка показало, что по истечении 1,5-2 мин поляризации электрода, преобладающими становятся диффузионные процессы в твердой фазе: происходит включение цинка в поверхностные слои электрода. Предварительная обработка стали в режиме дофазового осаждения сказывается на скорости процесса последующего наращивания толщины цинкового покрытия и на характере хода кривых плотность тока - время. Установлено, что механизм зародышеобразования, проанализированный при формировании цинкового покрытия из электролита, содержащего сернокислые соли цинка, натрия и алюминия, не меняется после проведения предварительной потенциостатической обработки стали в режиме дофазового осаждения. Применение предварительной обработки стали в потенциостатическом режиме дофазового осаждения в электролитах цинкования приводит к снижению скорости выделения водорода, соответственно, к меньшей пористости покрытия и большей его защитной способности.*

**Ключевые слова:** электроосаждение, цинкование, кислый электролит, дофазовое осаждение, твердофазная диффузия, зародышеобразование, потенциостатический режим осаждения, защитная способность

### Для цитирования:

Панкратов И.С., Почкина С.Ю., Соловьева Н.Д., Ялымова Т.Ю. Электроосаждение цинка из кислых электролитов на стальную подложку, предварительно обработанную, в потенциостатическом режиме дофазового осаждения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 44–50

### For citation:

Pankratov I.S., Pochkina S.Yu., Solovieva N.D., Yalymova T.Yu. Electrodeposition of zinc from acid electrolytes on a steel substrate preliminary treated in the potentiostatic mode of dophase deposition. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 44–50

## ELECTRODEPOSITION OF ZINC FROM ACID ELECTROLYTES ON A STEEL SUBSTRATE PRELIMINARY TREATED IN THE POTENTIOSTATIC MODE OF DOPHASE DEPOSITION

I.S. Pankratov, S.Yu. Pochkina, N.D. Solovieva, T.Yu. Yalymova

Ilya S. Pankratov (ORCID 0000-0002-1171-0775)\*

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Polytekhnicheskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia  
E-mail: ilya.wolf765@yandex.ru

Svetlana Yu. Pochkina (ORCID 0000-0001-6856-0029), Nina D. Solovieva (ORCID 0000-0002-0421-9347),  
Tatiana Yu. Yalymova (ORCID 0000-0001-5620-6778)

Department of Technology and Equipment for Chemical, Oil and Gas, Food Production, Engels Technological Institute, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina, Svobody sq., 17, Engels, 413100, Russia

E-mail: tepeti@mail.ru

*The effect of pretreatment of the steel surface of a product in the potentiostatic mode of underpotential (pre-phase) deposition on the process of zinc electrodeposition from acidic electrolytes has been investigated. In order to determine the polarization potential in the underpotential deposition mode, the equilibrium potential of the zinc electrode in solutions of the studied compositions was measured. Pretreatment of the initial steel electrode (St3 was used) in the potentiostatic underpotential deposition mode was carried out at potentials 50 mV below the equilibrium value. It is shown that the content of zinc in the surface layer of the steel electrode, determined by the X-ray fluorescence method, depends on the polarization time and the composition of the electrolyte. The duration of the underpotential polarization of the electrode was determined to be no more than 3 min. Due to the unstable state of the interface in the underpotential deposition mode, an increase in the polarization time is impractical. The study of the kinetics of underpotential deposition of zinc showed that after 1.5-2 min of electrode polarization, diffusion processes in the solid phase become predominant: zinc is included in the surface layers of the electrode. Pretreatment of steel in the pre-phase deposition mode affects the rate of the subsequent increase in the thickness of the zinc coating and the character of the current density - time curves. It was found that the nucleation mechanism analyzed during the formation of a zinc coating from an electrolyte containing sulfate salts of zinc, sodium and aluminum does not change after preliminary potentiostatic treatment of steel in the underpotential deposition mode. The use of pretreatment of steel in the potentiostatic underpotential deposition mode in galvanizing electrolytes leads to a decrease in the rate of hydrogen evolution and, accordingly, to a lower porosity of the coating and a higher protective ability.*

**Key words:** electrodeposition, zinc plating, acidic electrolyte, underpotential deposition, solid-phase diffusion, nucleation, potentiostatic deposition mode, protective ability

### ВВЕДЕНИЕ

Ежегодные потери металла от коррозии составляют от 35 до 40%. Для предотвращения разрушения металла применяются различные технологии. Одной из таких технологий является цинкование, активно используемое в промышленности для защиты металла от возникновения и развития коррозии [1-4]. Цинковое покрытие позволяет продлить срок службы металлического изделия, улучшить его характеристики, сделать эксплуатацию изделий более надежной.

В связи с востребованностью процесса, интерес к совершенствованию технологии цинкова-

ния не ослабевает [5-15]. Реализация любой технологии подразумевает нанесение слоя цинка на предварительно подготовленную поверхность. Это означает, что одной из возможностей повышения эффективности технологического процесса и изменения свойств формирующегося покрытия является модифицирование поверхностного слоя стали на стадии предварительной обработки. Перспективным направлением представляется кратковременная обработка поверхности при потенциалах положительнее равновесных значений осаждаемого металла в изучаемых электролитах (при недонапряжении). На чужеродной подложке в условиях недонапряжения происходит формирование первого монослоя электроосаждаемого металла. Рядом

авторов этот процесс определяется как «underpotential deposition», т.е. «предварительное осаждение» (Колб), «осаждение при недонапряжении» (Малеева Е.А., Педан К.С., Пономорев И.И.), «дофазовое осаждение (ДФО)» (Антропов Л.И., Плит В.). Указанная обработка создает возможность модифицирования поверхности изделия, что в дальнейшем сказывается на скорости наращивания слоя осадка, а также влияет на скорость выделения водорода, наводороживания материала осадка и подложки, на структуру и свойства покрытия [11, 16-19]. Интересным является тот факт, что в результате ДФО в поверхностных слоях образуется сплав металла основы и электроосаждаемого компонента [11, 16, 17, 20].

В настоящее время осаждение цинка производится из слабокислых, кислых и щелочных растворов [1-15]. Используемые электролиты, в большинстве своем, имеют многокомпонентный состав, в том числе добавки органических соединений для обеспечения требуемых свойств. Известно, что гальванический цинк, полученный из разных электролитов, отличается по физико-химическим и механическим свойствам. В.Н. Кудрявцев отмечает [1], что стало «модным» увлечение ярко-блестящими покрытиями, для получения которых применяют всевозможные усилители блеска, однако излишняя органика в покрытии затрудняет промывку после цинкования [21, 22] и последующее хромирование. Использование дофазового осаждения позволяет снизить содержание органических добавок в растворе электролита, при этом сохранив и повысив качество получаемых покрытий [11, 17].

Целью данной работы является изучение кинетики электроосаждения цинка на стальную подложку, предварительно обработанную в потенциостатическом режиме дофазового осаждения и влияние данной обработки на защитную способность получаемого покрытия.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электроосаждение цинкового покрытия толщиной 15 мкм осуществлялось на поверхность стальной подложки (Ст3). Использовались 2 электролита следующих составов [2]:

- $ZnSO_4$  – 174 г/л,  $Na_2SO_4$  – 33 г/л,  $Al_2(SO_4)_3$  – 30 г/л, pH 3 (электролит 1),
- $ZnSO_4$  – 53 г/л, KCl – 190 г/л,  $H_3BO_3$  – 20 г/л, pH 4 (электролит 2).

Определение pH электролитов производилось с помощью pH-метра «pH METER pH-410».

Рабочая поверхность электрода составляла 1 см<sup>2</sup>, нерабочая часть изолировалась кислотостой-

ким лаком. Подготовка стального электрода состояла в механическом шлифовании поверхности, обезжиривании органическим растворителем, травлении в растворе HCl концентрацией 50 г/л. Дополнительная предварительная обработка электрода проводилась в режиме дофазовой катодной поляризации в рабочем электролите. Анодом служил цинк марки ЦО. Потенциал рабочего электрода измерялся относительно хлоридсеребряного электрода сравнения.

Согласно литературным данным [23], сдвиг потенциала от его равновесного значения может колебаться от 500 мВ до 50-30 мВ. Атомы цинка имеют высокую энергию связи с поверхностью металла при недонапряжении в 500 мВ и низкую при недонапряжении в 50 мВ. Предотвратить растворение атомов цинка можно последующей поляризацией электрода с образованием осадка при перенапряжении. Так как в работе изучается влияние предварительной обработки поверхности стали, был выбран потенциал поляризации в режиме ДФО на 50 мВ более положительный, чем равновесное значение  $Zn$  электрода в исследуемых электролитах ( $E_p$ ). Перед измерением равновесного потенциала электрода в исследуемых растворах поверхность цинка механически зачищалась, обезжиривалась, травилась в растворе соляной кислоты, промывалась в дистиллированной воде. На основании 5 параллельных измерений установлено, что  $E_p$  в электролите 1 составляет -0,977 В, в электролите 2 –  $E_p = -1,001$  В.

Кинетика электроосаждения изучалась потенциостатическим методом на потенциостате Elins P-8S. Кривые плотность тока – время снимались при температуре  $20 \pm 2$  °С на стальном электроде при потенциале -1,2 В без предварительной катодной обработки, а также на стальном электроде в две стадии: поляризация в режиме дофазового осаждения и последующее наращивание толщины осадка при потенциале -1,2 В.

Сравнительная оценка коррозионной стойкости получаемых покрытий проводилась путем определения области пассивного состояния на кривых плотность тока – потенциал при снятии потенциодинамической кривой в 3% растворе NaCl при скорости развертки потенциала 4 мВ/с. Состав поверхности электрода анализировался рентгенофлуоресцентным методом прибором X-MET 7500. У электроосажденных покрытий проводилась оценка адгезии покрытия к стальной поверхности в соответствии с ГОСТ 9.302-88.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость катодного процесса на стальном электроде в исследуемых составах электролитов при его поляризации при потенциалах близких к равновесному потенциалу цинка ( $E_{дфо}$ ) снижается в течение 3-4 с до стационарного значения (рис. 1).

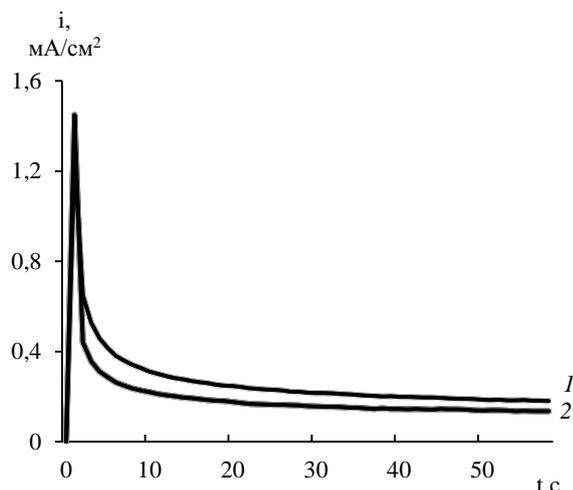


Рис. 1.  $i-t$  кривые предварительного дофазового осаждения Zn на стальной электрод из электролитов состава: 1 – электролит 1,  $E_{дфо} = -0,927$  В, 2 – электролит 2,  $E_{дфо} = -0,951$  В  
Fig. 1.  $i-t$  curves of preliminary pre-phase deposition of Zn on a steel electrode from electrolytes of the following composition: 1 - electrolyte 1,  $E_{ppd} = -0.927$  V, 2 - electrolyte 2,  $E_{ppd} = -0.951$  V

На этапе предварительной обработки стали в режиме ДФО влияние состава исследуемых электролитов на скорость катодной реакции незначительно. В результате поляризации происходит электровосстановление цинка, о чем свидетельствуют данные о его наличии на рабочем стальном электроде, полученные рентгенофлуоресцентным методом (табл. 1).

Таблица 1

Содержание цинка (масс. %) в составе стального электрода после его поляризации в режиме дофазового осаждения в электролитах изучаемых составов  
*Table 1. Zinc content (wt%) in the composition of the steel electrode after its polarization in the pre-phase deposition mode in electrolytes of the studied compositions*

Время поляризации в режиме ДФО, мин	Содержание Zn в составе электродов после поляризации в режиме ДФО, масс. %	
	Электролит 1	Электролит 2
1 мин	0,65±0,052	0,42±0,040
3 мин	0,41±0,040	0,38±0,034
7 мин	0,35±0,036	0,51±0,043

Колебания в количестве электровосстановленного цинка в составе стального электрода во времени вероятно связаны с нестабильностью формирующегося в заданных условиях поверхностного слоя. Согласно Гамбургу Ю.Д. [23], адатомы Zn, осажденные при недонапряжении 30-50 мВ, обладают относительно низкой энергией связи с поверхностью металла и могут растворяться без воздействия внешней анодной поляризации. В результате чего не происходит последовательного накопления цинка на подложке при увеличении времени поляризации.

Исходя из полученных результатов, было выбрано время предварительного дофазового осаждения, не превышающее 3 мин. Характерный ход  $i, t$  кривых в режиме ДФО (рис. 1) позволяет предположить диффузионные ограничения в скорости исследуемого процесса и проанализировать спад тока в координатах  $i, 1/\sqrt{t}$  (рис. 2). На полученных зависимостях наблюдаются прямолинейные участки с разными наклонами. В начальный период времени (участок I на  $i, 1/\sqrt{t}$  кривых) зависимость  $i, 1/\sqrt{t}$  не экстраполируется в начало координат, что может свидетельствовать о влиянии химических процессов на границе раздела фаз на скорость электрохимической реакции. По истечении 1,5-2 с начинают преобладать диффузионные процессы. Согласно литературным данным [23], процесс образования адатомов цинка в условиях ДФО происходит со значительным выигрышем в энергии при образовании связи металл-подложка, по сравнению с образованием связи между атомами металла. Образование трехмерного осадка в условиях ДФО маловероятно, и образовавшиеся адатомы цинка диффундируют в поверхностные слои подложки по вакансионному механизму. Об этом свидетельствует экстраполяция  $i, 1/\sqrt{t}$  кривых (участок II) в начало координат (рис. 2).

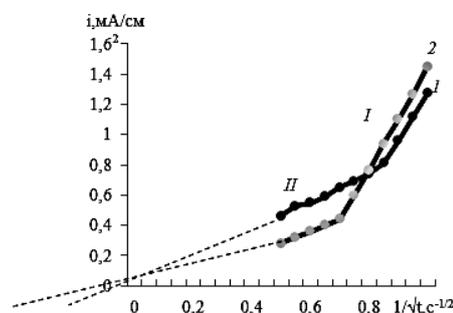


Рис. 2.  $i-1/\sqrt{t}$  кривые предварительного дофазового осаждения Zn на стальной электрод из электролитов состава: 1 – электролит 1,  $E_{дфо} = -0,927$  В, 2 – электролит 2,  $E_{дфо} = -0,951$  В  
Fig. 2.  $i-1/\sqrt{t}$  curves of preliminary pre-phase deposition of Zn on a steel electrode from electrolytes of the following composition: 1 - electrolyte 1,  $E_{ppd} = -0.927$  V, 2 - electrolyte 2,  $E_{ppd} = -0.951$  V

Прямолинейный ход  $i, 1/\sqrt{t}$  кривых позволил рассчитать величину  $C\sqrt{D}$  в соответствии с уравнением Коттрела:

$$C\sqrt{D} = \frac{\Delta i}{\Delta(\frac{1}{\sqrt{t}})} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{nF}, \quad (1)$$

где  $n$  – число электронов,  $F$  – число Фарадея,

$\frac{\Delta i}{\Delta(\frac{1}{\sqrt{t}})}$  – угол наклона прямой  $i, 1/\sqrt{t}$ .

Результаты расчета  $C\sqrt{D}$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние состава электролита цинкования и времени поляризации на величину  $C\sqrt{D}$  при предварительной дофазовой обработке стального электрода**  
**Table 2. Influence of the composition of galvanizing electrolyte and polarization time on the value of  $C\sqrt{D}$  during pre-phase treatment of a steel electrode**

Состав электролита	$C\sqrt{D}$ , моль/см <sup>2</sup> ·с <sup>-1/2</sup>	
	1 с÷1,5 с	1,5 с÷4 с
Электролит 1	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$0,92 \cdot 10^{-5}$
Электролит 2	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$0,76 \cdot 10^{-5}$

Величина  $C\sqrt{D}$  подтверждает высказанное предположение о диффузии цинка в стальную основу электрода. Включение цинка в поверхностные слои стали сказывается на скорости последующего наращивания слоя цинкового покрытия (рис. 3).

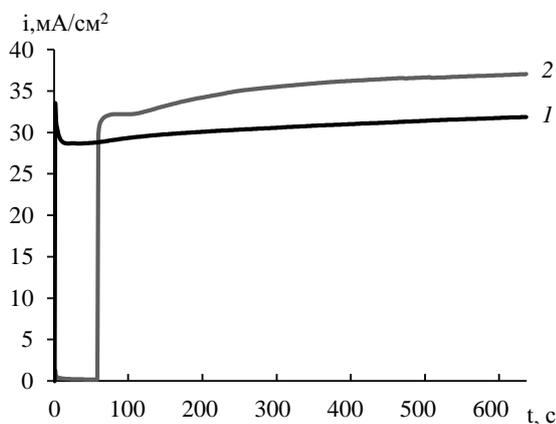


Рис. 3.  $i, t$  кривые электроосаждения Zn на сталь из электролита состава 1 при  $E = -1,2$  В: 1 – без проведения предварительной дофазовой обработки поверхности стали; 2 – после предварительной дофазовой обработки поверхности стали. Режим ДФО стали в электролите 1:  $E_{дфо} = -0,927$  В,  $t = 1$  мин

Fig. 3.  $i, t$  curves of Zn electrodeposition on steel from electrolytes of composition 1 (a) at  $E = -1.2$  V: 1 - without preliminary pre-phase treatment of the steel surface; 2 - after preliminary pre-phase treatment of the steel surface. UPD mode of steel in electrolyte 1:  $E_{upd} = -0.927$  V

Характер  $i, t$  кривых в электролите 2 не меняется, только снижается плотность тока процесса

осаждения на электроде, предварительно обработанном в режиме ДФО, что может быть связано с уменьшением скорости выделения водорода за счет увеличения перенапряжения процесса на модифицированной цинком поверхности электрода.

В электролите 1 скорость процесса наращивания цинкового слоя возрастает, и несколько меняется характер хода  $i, t$  кривых. Подъем плотности тока после незначительного его снижения при включении потенциала поляризации  $-1,2$  В позволяет проанализировать его в координатах  $\lg(i/t), t^2$  и выяснить механизм зародышеобразования при формировании покрытия. Установлено (рис. 4): указанная зависимость линейризуется с достоверностью  $0,985-0,989$ , что свидетельствует об образовании двухмерных зародышей при электроосаждении цинка из кислых электролитов в заданном потенциостатическом режиме поляризации. Следует отметить, что на механизм зародышеобразования не влияет предварительная обработка поверхности стали в режиме дофазового осаждения.

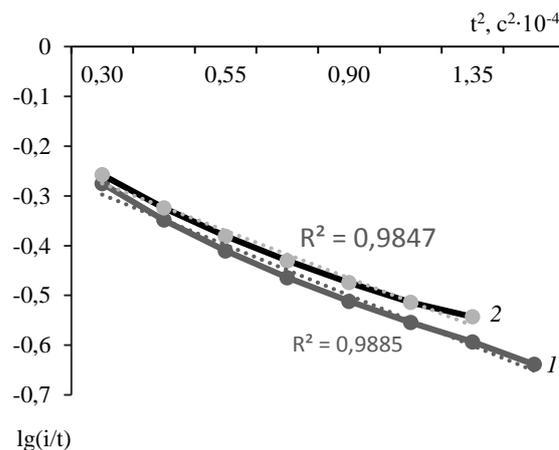


Рис. 4.  $\lg(i/t), t^2$  зависимости электроосаждения Zn на сталь из электролита состава 1 при  $E = -1,2$  В: 1 – без проведения предварительной дофазовой обработки поверхности стали; 2 – после предварительной дофазовой обработки поверхности стали в течение 1 мин

Fig. 4.  $\lg(i/t), t^2$  dependences of Zn electrodeposition on steel from electrolyte of composition 1 at  $E = -1.2$  V: 1 - without preliminary pre-phase treatment of the steel surface; 2 - after preliminary pre-phase treatment of the steel surface for 1 min

Оценка коррозионной стойкости электроосажденных цинковых покрытий по анализу области пассивного состояния на электроде при потенциодинамической поляризации в 3% растворе NaCl в анодную область показала положительное влияние предварительной ДФО поверхности стали, наиболее выраженное при использовании электролита состава 1:  $ZnSO_4 - 174$  г/л,  $Na_2SO_4 - 33$  г/л,  $Al_2(SO_4)_3 - 30$  г/л (табл. 3).

**Таблица 3**  
**Величина области пассивного состояния ( $\Delta E$ ) электроосажденных цинковых покрытий в 3% растворе NaCl**

**Table 3. The value of the passive state region ( $\Delta E$ ) of electrodeposited zinc coatings in a 3% NaCl solution**

Электролит	$\Delta E$ , мВ	
	Без ДФО	С ДФО
Электролит 1	57	80
Электролит 2	60	62

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований было установлено влияние предварительной обработки стального электрода в потенциостатическом режиме дофазового осаждения на скорость электроосаждения цинка из кислых растворов, на механизм зародышеобразования осадков. Полученные экспериментальные данные показали, что при пред-

варительной катодной обработке электрода в режиме ДФО, наблюдается твердофазная диффузия цинка в стальную основу. Включение цинка в поверхностные слои электрода сказывается на скорости последующего наращивания толщины покрытия до требуемого значения. Установлено, что в кислом электролите, содержащем серноокислые соли цинка, натрия и алюминия, независимо от предварительной обработки поверхности формируются двухмерные зародыши. Наличие цинка в поверхностных слоях стального электрода увеличивает перенапряжение выделения водорода, в связи с чем уменьшается пористость покрытия и возрастает его защитная способность.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев В.Н., Мамаев В.И., Окулов В.В., Скопинцев В.Д. Об областях применения цинковых покрытий; о составах фосфатирования под окраску; о составах раствора холодного оксидирования; о коррозионной стойкости Zn-покрытий с пассивацией; о «самозалечиваемости» пассивной Cr(VI) пленки; о цинк-ламеллярных покрытиях. *Гальванотех. и обраб. пов.* 2011. Т. 19. № 4. С. 11–15.
2. Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология. М.: Глобус. 2008. 252 с.
3. Губин А.Ф., Козлова Е.Н., Гусев В.Ю. Перспективная технология гальванического цинкования. *Обор. компл. – науч.-тех. прогр. Росс.* 2006. № 1. С. 71–73.
4. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Влияние способа цинкования на физико-механические и защитные свойства цинковых покрытий. *Корроз.: мат., зац.* 2006. № 5. С. 34–42.
5. Высоцкая Н.А., Кабылбекова Б.Н., Исабаева К. Роль ПАВ в формировании цинкового покрытия в кислом электролите цинкования. *Наука в совр. мире: сборн. науч. труд.* 2018. С. 129–133.
6. Sorour N., Zhang W., Gabra G. Electrochemical studies of ionic liquid additives during the zinc electrowinning process. *Hydrometallurgy*. 2015. N 157. P. 261–269. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.09.003.
7. Шевченко Т.Ю., Соловьева Н.Д. Электроосаждение цинка из сульфатного электролита в стационарном и реверсивном режимах электролиза. *Хим. тех.* 2015. Т. 16. № 12. С. 726–732.
8. Плохов С.В., Матасова И.Г., Воротынцев В.М., Харитонов И.Ю. Электроосаждение цинка из серноокислых ионообменных электролитов. *Изв. вузов. Хим. и хим. технология.* 2001. Т. 44. Вып. 5. С. 171–174.
9. Медведев Г.И., Макрушин Н.А., Хамунела В. Электроосаждение блестящих цинковых покрытий из сульфатного электролита *Жур. прикл. хим.* 2007. Т. 80. № 8. С. 1276–1281. DOI: 10.1134/S1070427207080101.

#### REFERENCES

1. Kudryavtsev V.N., Mamaev V.I., Okulov V.V., Skopintsev V.D. About the fields of application of zinc coatings; about phosphating compositions for coloring; about the composition of the cold oxidation solution; about corrosion resistance of Zn-coatings with passivation; about "self-healing" of passive Cr (VI) film; on zinc-lamellar coatings. *Galvanotekh. Obrab. Pov.* 2011. V. 19. N 4. P. 11–15 (in Russian).
2. Okulov V.V. Zinc plating. Technique and technology. M.: Globus. 2008. 252 p. (in Russian).
3. Gubin A.F., Kozlova E.N., Gusev V.Yu. Promising technology of galvanic zinc coating. *Obor. Kompl. – Nauch.-Tekh. Progr. Ross.* 2006. N 1. P. 71–73 (in Russian).
4. Proskurkin E.V., Sukhomlin D.A. The influence of the method of zinc coating on the physical, mechanical and protective properties of zinc coatings. *Korroz.: Mater., Zashch.* 2006. N 5. P. 34–42 (in Russian).
5. Vysotskaya N.A., Kabylbekova B.N., Isabaev K. The role of surfactants in the formation of zinc coating in acid zinc electrolyte. *Nauka sovr. mire: sborn. nauch. trud.* 2018. P. 129–133 (in Russian).
6. Sorour N., Zhang W., Gabra G. Electrochemical studies of ionic liquid additives during the zinc electrowinning process. *Hydrometallurgy*. 2015. N 157. P. 261–269. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.09.003.
7. Shevchenko T.Yu., Solovyova N.D. Electrodeposition of zinc from sulfate electrolyte in stationary and reversible electrolysis modes. *Khim. Tekh.* 2015. V. 16. N 12. P. 726–732 (in Russian).
8. Plokhov S.V., Matasova I.G., Vorotyntsev V.M., Kharitonova I. Yu. Zinc Electrodeposition from Sulfuric Ion-Exchange Electrolytes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. tekhnol.]*. 2001. V. 44. N 5. P. 171–174 (in Russian).
9. Medvedev G.I., Makrushin N.A., Khamunela V. Electrodeposition of shiny zinc coatings from sulfate electrolyte. *Zhur. Prikl. Khim.* 2007. V. 80. N 8. P. 1276–1281 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427207080101.

10. **Киреев С.Ю., Янгуразова А.З., Киреева С.Н.** Электроосаждение гальванических покрытий цинком из цинкатного электролита с использованием гальваностатического режима импульсного электролиза. *Гальванотех. и обраб. пов.* 2020. Т. 28. № 1. С. 4-10. DOI: 10.47188/0869-5326\_2020\_28\_1\_4.
11. **Минин И.В., Соловьева Н.Д.** Кинетические закономерности электровосстановления цинка в присутствии ПАВ. *Науч. обзор.* 2013. № 10. С. 131-134.
12. **Перельгин Ю.П., Киреев С.Ю., Ягниченко Н.В.** Электрохимическое осаждение цинка из электролита, содержащего молочную кислоту. *Изв. Высш. Учебн. завед. Пов. рег. Естеств. науки.* 2013. № 2 (2). С. 102-109.
13. **Ялымова Т.Ю., Соловьева Н.Д.** Электроосаждение цинковых покрытий в реверсивном режиме в присутствии ПАВ. *Гальванотех. и обраб. пов.* 2020. Т. 28. № 1. С. 28-33. DOI: 10.47188/0869-5326\_2020\_28\_1\_28.
14. **Шайдурова Г.И., Васильев И.Л.** Разработка и экспериментальное опробирование высокоэффективных бесцианистых электролитов при нанесении цинковых электрохимических покрытий в гальванических производствах. *Вест. Перм. Научн. центра УРО РАН.* 2010. № 4. С. 88-91.
15. **Ченцова Е.В., Почкина С.Ю., Соловьева Н.Д., Лопухова М.И.** Кинетика электроосаждения сплава цинк-никель из сульфатно-глицинатного электролита. *Изв. вузов. Хим. и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 128-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196204.5833.
16. **Легкая Д.А., Соловьева Н.Д.** Роль дофазового осаждения в процессе электроосаждения защитного никелевого покрытия. *Корроз.: матер., зац.* 2017. № 7. С. 35 - 39.
17. **Легкая Д.А., Соловьева Н.Д., Яковлев А.В.** Физико-механические свойства никелевого покрытия, осажденного из сульфатного электролита никелирования с использованием предварительного дофазового осаждения. *Жур. прикл. хим.* 2017. № 9. С. 1199 - 1204. DOI: 10.1134/S1070427217090129.
18. **Шафей А.Л., Тагучн С., Арамата Л.** Формирование адатомных слоев цинка на Pt(III) Pt(II) в присутствии борной кислоты и хлорид ионов. *Электрохимия.* 2009. Т. 41. № 2. С. 745-751.
19. **Mascaro L.N., Santos M.C., Machado S.A.S., Avaca L.A.** Voltammetric and Rotating Ring-Disk Studies of the Influence of Anions in the Underpotential Deposition of Zinc on platinum. *J. Braz. Chem. Soc.* 2002. V. 13. N 4. P. 529 - 534. DOI: 10.1590/S0103-50532002000400019.
20. **Андреев Ю.Я.** Термодинамические предпосылки высокой скорости диффузии атомов в поверхностном слое металлических электродов. *Защ. мет.* 2007. Т. 43. № 1. С. 18-24. DOI: 10.1134/S003317320701002X.
21. **Виноградов С.С.** О классификации электролитов. *Гальванотех. и обраб. пов.* 2007. Т. 15. № 2. С. 48 - 50.
22. **Виноградов С.С.** Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус. 2002. 352. с.
23. **Гамбург Ю.Д.** Кинетика начального этапа роста зародышей при электрокристаллизации металлов. *Электрохимия.* 2002. Т. 38. № 10. С. 1273 - 1275. DOI: 10.1023/B:RUEL.0000016339.58450.8d.
10. **Kireev S.Yu., Yangurazova A.Z., Kireeva S.N.** Electrodeposition of galvanic coatings with zinc from zinc electrolyte using the galvanostatic mode of pulse electrolysis. *Galvanotekh. Obrab. Pov.* 2020. V. 28. N 1. P. 4-10 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326\_2020\_28\_1\_4.
11. **Minin I.V., Solovyova N.D.** Kinetic patterns of zinc electroreduction in the presence of surfactants. *Nauch. Obozr.* 2013. N 10. P. 131-134 (in Russian).
12. **Perelygin Yu. P., Kireev S. Yu., Yagnichenko N. V.** Electrochemical deposition of zinc from an electrolyte containing lactic acid. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Pov. Reg. Yestestv. Nauki.* 2013. N 2 (2). P. 102-109 (in Russian).
13. **Yalymova T.Yu., Solovyova N.D.** Electrodeposition of zinc coatings in a reverse mode in the presence of surfactants. *Galvanotekh. Obrab. Pov.* 2020. V. 28. N 1. P. 28-33 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326\_2020\_28\_1\_28.
14. **Shaidurova G.I., Vasiliev I.L.** Development and experimental testing of highly effective cyanide-free electrolytes in the application of zinc electrochemical coatings in electroplating. *Vest. Perm. Nauchn. Tsentra URO RAN.* 2010. N 4. P. 88-91 (in Russian).
15. **Chentsova E.V., Pochkina S.Yu., Solovieva N.D., Lopukhova M.I.** Kinetics of electrodeposition of zinc-nickel alloy from sulfate-glycinate electrolyte. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. tekhnol.].* 2019. V. 62. N 4. P. 128-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196204.5833.
16. **Legkaya D.A., Solovyova N.D.** The role of pre-phase deposition in the process of electrodeposition of a protective nickel coating. *Korroz.: Mater., Zashch.* 2017. N 7. P. 35 - 39 (in Russian).
17. **Legkaya D.A., Solovyova N. D., Yakovlev A.V.** Physico-mechanical properties of nickel plating deposited from nickel-plating sulfate electrolyte using preliminary pre-phase deposition. *Zhur. Prikl. Khim.* 2017. N 9. P. 1190 - 1204 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427217090129.
18. **Shafey A.L., Taguchn S., Aramata L.** Formation of adatomic zinc layers on Pt (III) Pt (II) in the presence of boric acid and chloride ions. *Elektrokhimiya.* 2009. V. 41. N 2. P. 745-751 (in Russian).
19. **Mascaro L.N., Santos M.C., Machado S.A.S., Avaca L.A.** Voltammetric and Rotating Ring-Disk Studies of the Influence of Anions in the Underpotential Deposition of Zinc on platinum. *J. Braz. Chem. Soc.* 2002. V. 13. N 4. P. 529 - 534. DOI: 10.1590/S0103-50532002000400019.
20. **Andreev Yu.Ya.** Thermodynamic prerequisites for the high rate of diffusion of atoms in the surface layer of metal electrodes. *Zashch. Met.* 2007. V. 43. N 1. P.18-24 (in Russian). DOI: 10.1134/S003317320701002X.
21. **Vinogradov S.S.** On the classification of electrolytes. *Galvanotekh. Obrab. Pov.* 2007. V. 15. N 2. P. 48 - 50 (in Russian).
22. **Vinogradov S.S.** Ecologically safe galvanic production. М.: Globus. 2002. 352 p. (in Russian).
23. **Gamburg Yu.D.** Initial nuclei growth period and period of non-steady-state nucleation during electrocrystallization. *Russ. Zhurn. Elektrokhim.* 2004. V. 40. N 2. P. 215-216. DOI: 10.1023/B:RUEL.0000016339.58450.8d.

Поступила в редакцию 28.01.2022  
Принята к опубликованию 28.04.2022

Received 28.01.2022  
Accepted 28.04.2022