

## **МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

doi:10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-2

## **MATERIALS AND EQUIPMENT FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

### **Антикоррозионные свойства супергидрофобного покрытия на стали, полученного электрохимическим способом**

**Л.Е. Цыганкова<sup>1</sup>✉, Л.Д. Родионова<sup>1</sup>, А.А. Урядников<sup>1</sup>,  
Д.А. Горлов<sup>1</sup>, И.А. Ломакина<sup>1</sup>, Н.В. Шель<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
392000, РФ, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33

<sup>2</sup>Тамбовский государственный технический университет,  
392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106

e-mail: vits21@mail.ru

**Аннотация.** Исследована защитная эффективность супергидрофобного (СГФ) покрытия на стальном электроде, полученного путем электроосаждения меди и цинка с последующей обработкой в этанольном растворе миристиновой кислоты. СГФ покрытие характеризуется контактным углом смачивания, равным  $157 \pm 2^\circ$ . Коррозионные испытания проведены гравиметрическим методом в условиях 100% влажности, в дистиллированной воде, в газовой и жидкой фазах 1 и 3% растворов  $SO_2$ , а также  $NaCl$  (50 г/л) и NACE (г/л:  $NaCl$  – 5;  $CH_3COOH$  – 0,25) в присутствии 1 избыточной атмосферы  $CO_2$  в течение 240 час. Супергидрофобное покрытие проявляет 100% защитный эффект  $Z$  при экспозиции образцов в условиях 100% влажности и в дистиллированной воде при практически постоянной величине контактных углов. В газовой фазе растворов  $NaCl + CO_2$  и NACE +  $CO_2$  защитный эффект равен 78 и 71% соответственно. В первом случае сохраняется супергидрофобность, во втором – гидрофобность, однако последующая выдержка на воздухе способствует восстановлению супергидрофобности. После испытаний в жидкой фазе сохраняется гидрофобность покрытия, но супергидрофобность не восстанавливается при выдержке на воздухе. В газовой фазе 1 и 3% растворов  $SO_2$   $Z$  равен 94 и 64% соответственно. В первом случае сохраняется супергидрофобность покрытия, во втором – гидрофобность, которая, однако, переходит в супергидрофобность при выдержке на воздухе. Поляризационные и импедансные измерения в растворе  $NaCl$  в течение 168 час показали, что наличие СГФ покрытия на стальном электроде обуславливает замедление анодного процесса по сравнению с незащищенным электродом. Величина  $Z$  покрытия в начальный момент близка к 90% и уменьшается во времени, достигая 70% через 168 час.

**Ключевые слова:** сталь, коррозия, супергидрофобное покрытие, защитный эффект, контактный угол смачивания, влажность, оксид углерода (IV), оксид серы (IV), потенциодинамическая поляризация, импедансная спектроскопия

**Для цитирования:** Цыганкова Л.Е., Родионова Л.Д., Урядников А.А., Горлов Д.А., Ломакина И.А., Шель Н.В. Антикоррозионные свойства супергидрофобного покрытия на стали, полученного электрохимическим способом // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 18-32. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-2>

Статья получена 14.10.2024. Принята к публикации 18.11.2024. Опубликована 01.12.2024.

**Благодарность.** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 1024042300021-5-2.4.2;4.1.1). Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина.

### **Anti-corrosive properties of superhydrophobic coating on steel obtained by electrochemical method**

**Liudmila E. Tsygankova<sup>1</sup>✉, Liudmila D. Rodionova<sup>1</sup>, Alexander A. Uryadnikov<sup>1</sup>,  
Denis A. Gorlov<sup>1</sup>, Irina A. Lomakina<sup>1</sup>, Natalia V. Shel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Derzhavin State University, 33, ul. Internatsyonalnaya, Tambov, 392000, Russian Federation

<sup>2</sup>Tambov State Technical University, 106, ul. Sovetskaya, Tambov, 392000, Russian Federation

e-mail: vits21@mail.ru

**Abstract.** The protective efficiency of a superhydrophobic (SHP) coating on a steel electrode obtained by electrodeposition of copper and zinc with subsequent treatment in an ethanol solution of myristic acid was studied in a number of environments. The SHP coating is characterized by a contact wetting angle equal to  $157 \pm 2^\circ$ . Corrosion tests were carried out gravimetrically under conditions of 100% humidity, distilled water, in the gas and liquid phases of 1 and 3%  $SO_2$  solutions, as well as  $NaCl$  (50 g/L) and NACE (g/L:  $NaCl$  – 5;  $CH_3COOH$  - 0,25) in the presence of 1 excess atmosphere of  $CO_2$  for 240 h. The superhydrophobic coating exhibits 100% protective effect  $Z$  when samples are exposed to 100% humidity and distilled water at a virtually constant value of contact angles. In the gas phase of  $NaCl + CO_2$  and NACE +  $CO_2$  solutions, the protective effect is 78 and 71% respectively. In the first case, superhydrophobicity is retained, in the second - hydrophobicity, but subsequent exposure to air helps restore superhydrophobicity. After the liquid phase, the coating retains its hydrophobicity, but its superhydrophobicity is not restored when exposed to air. In the gas phase of 1 and 3%  $SO_2$  solutions,  $Z$  is 94 and 64% respectively. In the first case, the coating retains its superhydrophobicity, while in the second case, it retains its hydrophobicity, which, however, turns into superhydrophobicity when exposed to air. Polarization and impedance measurements in a  $NaCl$  solution for 168 hours showed that the presence of the SHP coating on the steel electrode causes a slowdown in the anodic process on the electrode compared to an unprotected electrode. The  $Z$  value of the coating at the initial moment is close to 90% and decreases over time, reaching 70% after 168 hours.

**Keywords:** steel, corrosion, superhydrophobic coating, protective effect, contact angle, humidity, carbon monoxide (IV), sulfur oxide (IV), potentiodynamic polarization, impedance spectroscopy

**For citation:** Tsygankova, L. E., Rodionova, L. D., Uryadnikov, A. A., Gorlov, D. A., Lomakina, I. A., & Shel, N. V. (2024). Anti-corrosive properties of superhydrophobic coating on steel obtained by electrochemical method. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(4), 18-32. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.114.4-2>

Received October 14, 2024. Accepted for publication November 18, 2024. Published December 12, 2024.

**Gratitude.** The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic 1024042300021-5-2.4.2;4.1.1). The results were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of Scientific equipment of TSU named after G.R. Derzhavin.

## Введение

Последние два десятилетия проводятся широкие исследования антикоррозионных свойств супергидрофобных покрытий (СГФП) на металлах. К супергидрофобным относятся покрытия, на которых краевой угол смачивания водой  $\geq 150^\circ$ . Предлагаются многочисленные способы получения электрохимическим путем супергидрофобных металлических покрытий на металлических субстратах. В качестве катодно-выделяемых металлов на защищаемых субстратах используются никель, цинк, медь, а также совместно осаждаемые никель и кобальт, медь и цинк. При этом возникает многомодальная шероховатость. Для придания супергидрофобных (СГФ) свойств на поверхность наносят гидрофобные агенты с низкой поверхностной энергией. В качестве таковых часто используются карбоновые кислоты с длинным углеводородным радикалом. В [1] СГФ цинковое покрытие было получено на образцах трубной стали посредством катодного осаждения цинка из раствора  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  (240 г/л) с  $Zn$  анодом, подкисленного до  $pH=4$ , при последовательном наложении плотности тока

4 А/дм<sup>2</sup> и 9 А/дм<sup>2</sup> с последующей обработкой в 0,01 М этианольном растворе перфторкаптановой кислоты в течение 11 дней при комнатной температуре. Контактный угол на полученном СГФ  $Zn$  покрытии составлял  $154,2^\circ$ , угол скатывания был меньше  $5^\circ$ . Контактный угол, по данным авторов, сохранял величину больше  $150^\circ$  при хранении на воздухе в течение 80 дней. Антикоррозионные свойства покрытия не изучались. В [2] описано получение СГФ покрытия на железе при катодном осаждении цинка из раствора 0,01 M  $Zn(CH_3COO)_2$  + 0,1 M  $NaCl$  + 0,1 M  $HCl$  при потенциале -1,8 В в течение 1100 с с последующим отжигом при 180 °C в течение 70 мин. Отжиг позволил получить супергидрофобное покрытие с контактным углом  $163 \pm 2^\circ$ , углом скатывания  $0 \pm 2^\circ$ . При хранении на воздухе при комнатной температуре в течение года контактный угол сохранял величину в пределах 162...166°. Антикоррозионные свойства покрытия были исследованы в 3% растворе  $NaCl$  методом потенциодинамической поляризации. Ток коррозии на образце с покрытием был на порядок меньше, чем на образце железа без покрытия, и на 2 порядка меньше, чем

на чистом цинке. Длительные исследования по антакоррозионному поведению не проводились. В [3] СГФ покрытие на стали было получено при катодном осаждении никеля из 0,5 M раствора  $NiSO_4$  при плотности тока 60 A/дм<sup>2</sup> с последующей выдержкой в 0,02 M растворе стеариновой кислоты в течение 1 мин. Контактный угол составлял 154,4°, угол скатывания 2°. Антакоррозионные свойства полученного СГФ покрытия были оценены в 3,5% растворе  $NaCl$  посредством потенциодинамической поляризации. Ток коррозии ( $i_{кор}$ ) на образце с СГФ покрытием составлял  $2,05 \cdot 10^{-5}$  мА/см<sup>2</sup> и был примерно в 3 раза ниже, чем на образце без покрытия. В [4] СГФ покрытие на низкоуглеродистой стали было получено на основе электроосажденного цинка. Вначале образец стали был оцинкован в растворе состава  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  (1,55 M) +  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  (0,25 M) +  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (0,06 M) с  $pH=3,5$  при плотности тока 8 A/дм<sup>2</sup> при 25 °C. Затем, после активации оцинкованной стали в 10% растворе  $HCl$  в течение 20 с, на ней был осажден потенциостатически слой цинка из раствора  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  (0,02 M),  $KCl$  (1,25 M) при потенциалах -1300 и -1500 мВ. После этого для формирования СГФ покрытия образцы были промыты водой, высушены и погружены на сутки в 0,01 M этианольный раствор стеариновой кислоты. Полученные СГФ покрытия характеризуются контактным углом 153...156°. Испытания в камере солевого тумана показали, что после 148 часов экспозиции величина  $\theta$  сохраняет значение  $\geq 151$ °. При испытаниях в 0,5 M растворе  $NaCl$  образцы потеряли супергидрофобность в первые 8 дней, но даже к концу месяца они сохранили гидрофобность с контактным углом  $\theta = 143 \pm 5$ °. В [5] СГФ покрытие получено на трубной стали X90 путем электроосаждения  $Cu-Zn$  из раствора  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $KNaC_4O_6H_4$  (100 г/л) и  $NaOH$  (50 г/л) при соотношении  $Zn^{2+}:Cu^{2+} = 1:1$  с последующей выдержкой в растворе 2,5 M  $KOH$ +0,12 M  $(NH_4)_2S_2O_8$  при 60 °C для получения иерархической структуры поверхности. После этого поверхность была обработана в 0,01 M этианольном растворе пентадекафтороктановой кислоты для придания супергидрофобности. Контактный угол СГФ покрытия составил 157°. Авторы рассчитали, что доля смоченных

участков на СГФ покрытии составляет 9,5%. Антакоррозионные свойства СГФ покрытия были оценены на основе поляризационных измерений в 3,5% растворе  $NaCl$  после выдержки электрода с СГФ покрытием в растворе в течение 1 часа. Ток коррозии на СГФ электроде равнялся  $4,128 \times 10^{-6}$  A/см<sup>2</sup> в отличие от незащищенного электрода, где  $i_{кор} = 7,270 \times 10^{-6}$  A/см<sup>2</sup>. Разница не слишком велика и не ясно, что будет наблюдаться после длительной выдержки в растворе. Авторы [6] предлагают способ получения СГФ покрытия без использования модификатора с низкой поверхностной энергией. Ими было получено СГФ покрытие на трубной стали X90 путем катодного осаждения  $Cu-Zn$  покрытия из такого же раствора, который использован в [5], и последующей выдержки на воздухе более 60 дней. Контактный угол покрытия  $\theta=154,73$ °, угол скатывания порядка 6,5°. Появление супергидрофобности объясняется образованием оксидов  $CuO$  и  $ZnO$ , а также адсорбцией кислорода. Супергидрофобность сохранялась при нахождении образцов с покрытием в воде в течение 5 час, а также при повышенной температуре до 200 °C в течение 9 час. Плотность тока коррозии в 3,5% растворе  $NaCl$  для образца с СГФ покрытием составляла  $4,3115 \times 10^{-7}$  A/см<sup>2</sup>, а в отсутствие покрытия  $-1,4637 \times 10^{-6}$  A/см<sup>2</sup>. Не ясно, насколько длительно пребывал образец в растворе. В большинстве исследований, как рассмотрено выше, защитная эффективность СГФ покрытий оценивается после 0,5- или 1- часовой экспозиции чаще всего в растворе хлорида натрия, по данным поляризационных или импедансных измерений. В редких случаях проводятся гравиметрические коррозионные испытания.

Целью данной работы является получение на стали Ст3 супергидрофобного покрытия электрохимическим методом и исследование его антакоррозионной эффективности при длительных испытаниях в разных средах.

### Методика эксперимента

Супергидрофобное покрытие на стальных образцах получали при электроосаждении меди и цинка с учетом эксперимента, описанного в [6], с некоторой модификацией. Использованы образцы стали Ст3

(30×40×1 мм) состава, масс. %:  $C$  – 0,28;  $Mn$  – 0,70;  $Si$  – 0,15;  $P$  – 0,04;  $S$  – 0,05;  $Cr$  – 0,30;  $Ni$  – 0,20;  $Cu$  – 0,20, остальное  $Fe$ . Перед электроосаждением образцы шлифовали и обезжиривали ацетоном. Затем, для удаления оксидного слоя с поверхности, их выдерживали в 10% растворе  $H_2SO_4$  в течение 2 мин. После этого образцы промывались дистиллированной водой и в качестве катода погружались в раствор состава  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  (29 г/л) +  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  (25 г/л) +  $CH_4O_6KNa \cdot 4H_2O$  (100 г/л) +  $NaOH$  (50 г/л). Электроосаждение проводилось при плотности тока 8 А/дм<sup>2</sup> в течение 7 мин, полученное при этом  $Cu-Zn$  покрытие было гидрофильным с краевым углом смачивания  $44 \pm 1^\circ$ . Промытый дистиллированной водой и высушенный образец выдерживался в течение часа в 0,1 M этианольном растворе миристиновой кислоты. Морфология покрытия оценивалась посредством сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (JSM 6390, JEOL, Япония). Использован также электронный микроскоп JCM-7000, JEOL, Япония, включающий энергетический дисперсионный спектроскоп (EDS), позволяющий оценить элементный состав поверхностного покрытия на металле. Краевые углы смачивания измерялись в 9 различных точках на поверхности при нанесении капель дистиллированной воды размером 3...4 мкл с использованием тензиометра (Easy Drop, KRUSS, Германия).

Защитную эффективность полученного СГФ покрытия исследовали при комнатной температуре в течение 240 час (10 суток) гравиметрическим методом в условиях 100% влажности, в дистиллированной воде, в газовой и жидкой фазах растворов  $NaCl$  (50 г/л) +  $CO_2$  (1 избыточная атмосфера), NACE +  $CO_2$  (1 избыточная атмосфера), 1% и 3% растворов  $SO_4^{2-}$ , а также электрохимическим методом в растворе  $NaCl$  (50 г/л). NACE – среда, используемая в Национальной Ассоциации инженеров-коррозионистов США, состава, г/л:  $NaCl$  – 5;  $CH_3COOH$  – 0,25. Продукты коррозии после испытаний были порошкообразного вида и легко удалялись кисточкой после высыхания поверхности.

Поляризационные потенциодинамические (скорость наложения потенциала 0,66 мВ/с) и импедансные измерения проводили по ме-

тодике, описанной в [7], через 15 мин после погружения электрода с СГФП в раствор и далее через каждые сутки в течение 168 часов без извлечения из раствора. Параллельно проводились измерения на стальном электроде без покрытия.

Величину защитного эффекта ( $Z$ , %) покрытия рассчитывали по формулам:

$$Z, \% = 100(K_o - K_{СГФП})/K_o \quad (1)$$

$$Z, \% = 100(i_o - i_{СГФП})/i_o J, \quad (2)$$

где  $K_o$  ( $i_o$ ) и  $K_{СГФП}$  ( $i_{СГФП}$ ) – скорость (плотность тока) коррозии в отсутствие и в присутствии СГФ покрытия соответственно. Величины  $i_o$  и  $i_{СГФП}$  определяли на основе поляризационных кривых (ПК) путем экстраполяции их тафелевских участков на потенциал коррозии.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

Морфология покрытия, полученного на стальном электроде при электроосаждении  $Cu-Zn$  и выдержке в растворе миристиновой кислоты, представлена на рис. 1. На поверхности видны крупные образования размером до 15...20 мкм и значительно более мелкие, что свидетельствует о разногоровневой шероховатости поверхности. Просматривающиеся пустоты способствуют захвату пузырьков воздуха, препятствующих проникновению жидкости к субстрату. Контактный угол полученного СГФ покрытия равен  $157 \pm 2^\circ$ . Содержание цинка в  $Cu-Zn$  покрытии составляет 36%.

По данным профилометра, шероховатость ( $R_a$ ) исходной стальной поверхности составила в среднем 0,594 мкм. После электроосаждения  $Cu-Zn$  покрытия и модификации в растворе миристиновой кислоты  $R_a$  образца с СГФ покрытием, в среднем, увеличилась до 2,17 мкм.

На рис. 2 приведен спектр СГФ покрытия на основе электроосаждения  $Cu-Zn$ , элементный состав которого подтверждает модификацию поверхности в растворе миристиновой кислоты.

Стабильность СГФ покрытия на поверхности стали была оценена путем промывания образцов в течение 10 минут потоком воды со скоростью 500 мл/мин, что привело к снижению величины контактного угла от

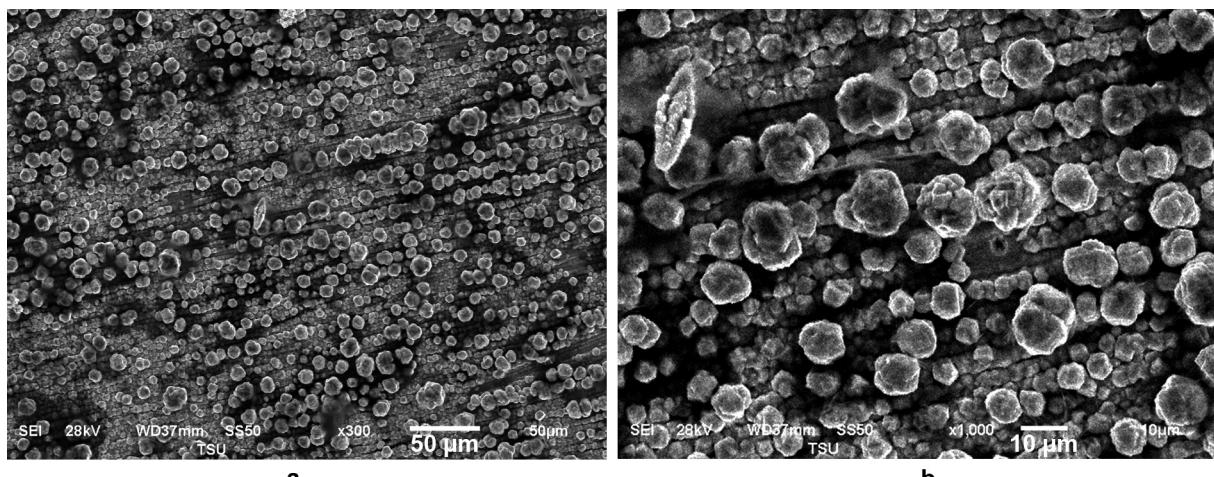
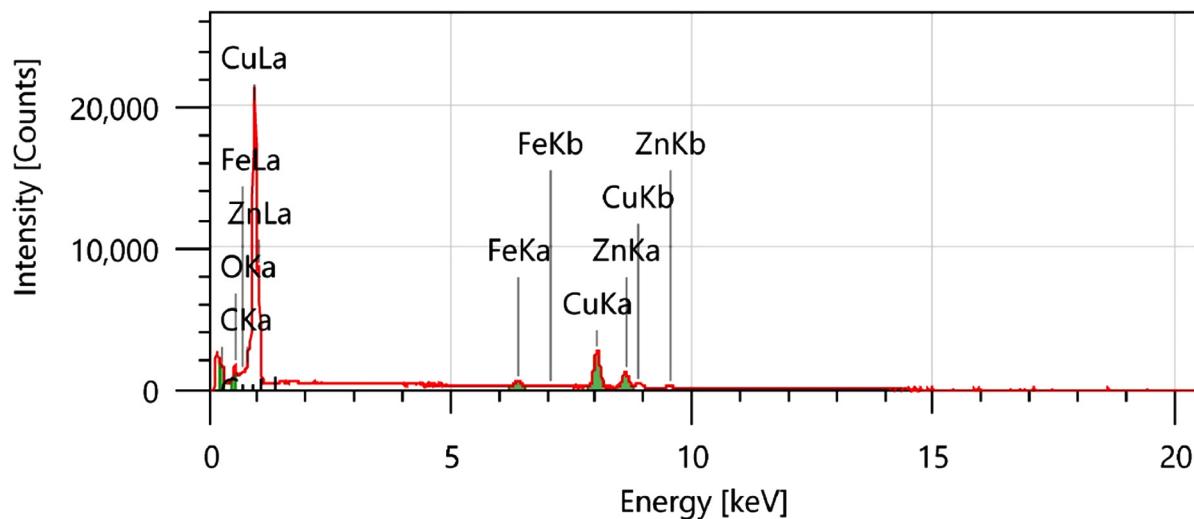


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности СГФ покрытия на основе электроосаждения Cu-Zn: а – x300, б – x1000

Fig. 1. SEM images of the surface of the Cu-Zn electrodeposited SHP coating:  
a – x300, b – x1000



Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	4.88±0.11	20.39±0.46
O	K	2.09±0.08	6.56±0.24
Fe	K	3.04±0.14	2.73±0.12
Cu	K	57.71±0.91	45.55±0.72
Zn	K	32.28±0.81	24.77±0.62
Total		100.00	100.00

Рис. 2. Энергодисперсионный спектр СГФ покрытия на основе Cu-Zn и его элементный состав

Fig. 2. EDS spectrum of a Cu-Zn-based SHP coating and its elemental composition

159 до  $148^\circ$ , однако последующая выдержка на воздухе в течение 20 суток способствовала восстановлению супергидрофобности с  $\theta = 154 \pm 1^\circ$ .

### Гравиметрические исследования

Деградация супергидрофобных покрытий сопровождается уменьшением статического краевого угла смачивания  $\theta$ , поэтому о стабильности покрытия можно судить на основе изменения  $\theta$  во времени.

Выдержка образцов стали с супергидрофобным покрытием в условиях 100%-ой

влажности в течение 10 суток не привела к потере массы и заметному изменению краевого угла смачивания. Последующая экспозиция на воздухе в течение 14 дней способствовала даже некоторому увеличению  $\theta$  по сравнению с исходным значением (рис. 3).

Экспозиция образцов с супергидрофобным покрытием в дистиллированной воде в течение 10 суток, как и в условиях 100%-ой влажности, не привела к существенному снижению величины контактных углов (рис. 4). Потери массы образца отсутствовали. Внешний вид покрытий не изменился. При последую-

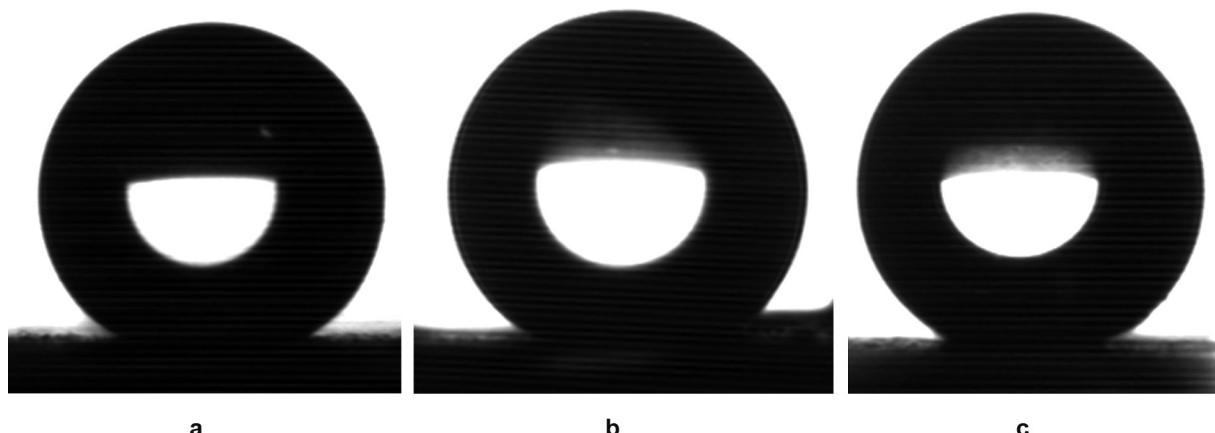


Рис. 3. Изображение капель воды на СГФ покрытии: а – исходное  $\theta = 157^\circ$ ,  
б – через 10 суток экспозиции при 100%-ой влажности  $\theta = 156^\circ$   
и с – после 14 дней выдержки на воздухе  $\theta = 157,5^\circ$

Fig. 3. Image of water droplets on a SHP coating: a – initial  $\theta = 157^\circ$ , b – after 10 days of exposure to 100% humidity  $\theta = 156^\circ$  and c – after 14 days of exposure to air  $\theta = 157,5^\circ$

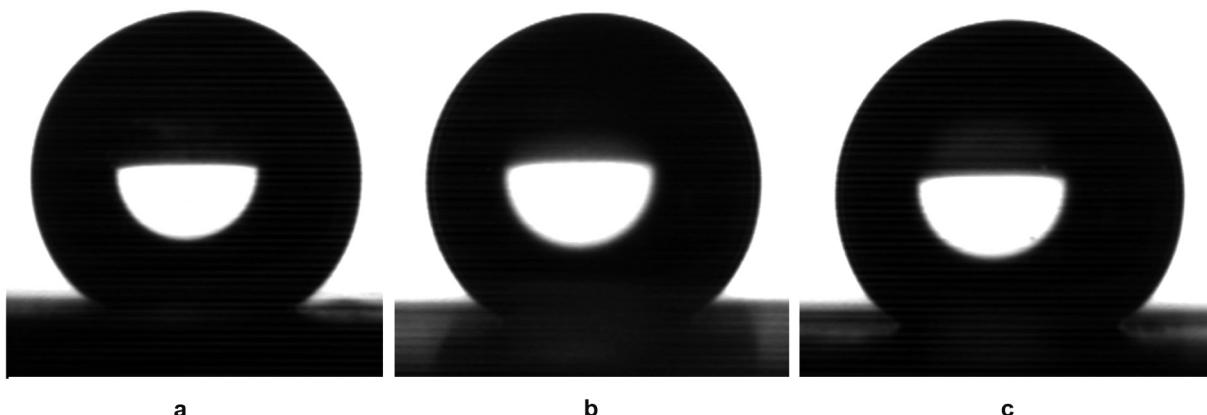


Рис. 4. Изображение капель воды на СГФ покрытии: а – исходное  $\theta = 157^\circ$ ,  
б – через 10 суток экспозиции в дистиллированной воде  $\theta = 155^\circ$   
и с – после 14 дней выдержки на воздухе  $\theta = 157^\circ$

Fig. 4. Image of water droplets on a SHP coating: a – initial  $\theta = 157^\circ$ , b – after 10 days of exposure to distilled water  $\theta = 155^\circ$  and c – after 14 days of exposure to air  $\theta = 157^\circ$

щей экспозиции на воздухе контактные углы приняли исходное значение.

Определенный интерес представляют коррозионные испытания углеродистой стали с исследуемым СГФ покрытием в жидкой и газовой фазах имитаторов пластовых вод нефтегазовых месторождений, в качестве которых использованы высокоминерализованная солевая среда (50 г/л  $NaCl$ ) и среда NACE, насыщенные  $CO_2$  до 1 избыточной атмосферы. Как видно из табл. 1, скорость коррозии в газовой и жидкой фазах NACE выше, чем в хлоридной среде. При этом покрытия более устойчивы в газовой фазе растворов, что может быть связано с более трудным отводом продуктов коррозии с поверхности. Защитная эффективность покрытия примерно в 2 раза выше в газовой

фазе растворов, чем в жидкой.

Краевой угол смачивания покрытия снижается в газовой фазе раствора  $NaCl$  на 3° с сохранением супергидрофобности и на 8° в газовой фазе NACE. В жидких фазах краевой угол снизился примерно на 24 и 30° соответственно, в средах  $NaCl$  и NACE, однако, гидрофобность покрытия сохранилась (табл. 2). Последующая экспозиция образцов с покрытием на воздухе привела через 35 суток к восстановлению супергидрофобности на образцах, экспонированных в газовой фазе среды NACE (рис. 5). Эти данные подтверждают описанные в литературе явления возникновения или увеличения супергидрофобности при выдержке на воздухе [6, 8-10]. У образцов, экспонированных на воздухе после испытаний в жидких фазах обе-

**Таблица 1. Скорость коррозии стали и защитный эффект СГФП в средах 50 г/л  $NaCl$  и NACE, насыщенных  $CO_2$  (1 изб. атм.), в газовой (числитель) и жидкой (знаменатель) фазах в течение 10 суток (240 час)**

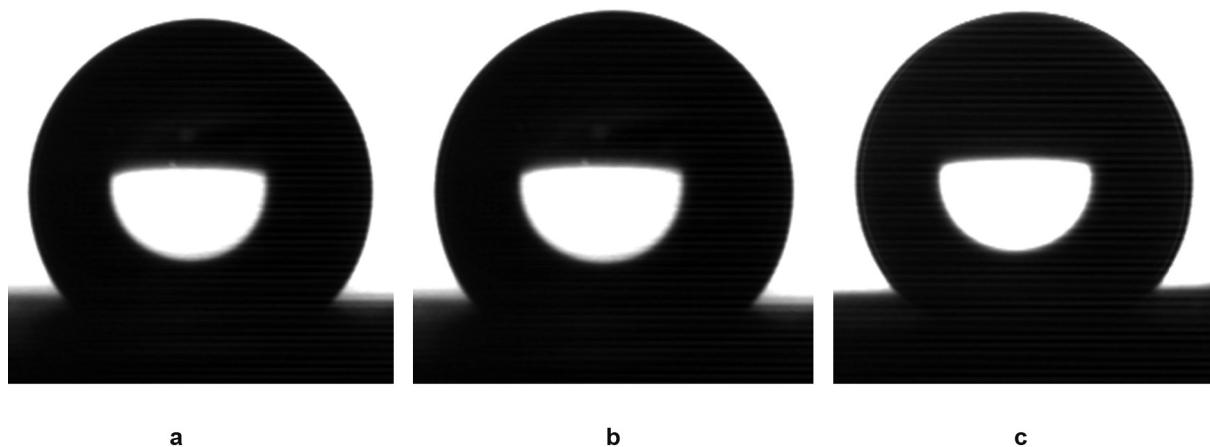
**Table 1. Steel corrosion rate and the protective effect of SHP coating in 50 g/L  $NaCl$  and NACE environments, saturated with  $CO_2$  (1 atm.), in gas (numerator) and liquid (denominator) phases for 10 days (240 hours)**

Среда / Medium	Образец / Sample	$K, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}) / K, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{h})$	$Z, \%$
50 г/л $NaCl+CO_2$ / 50 г/л $NaCl+CO_2$	Сталь / Steel	0,0515 / 0,131	-
	Сталь с СГФП / Steel with SHP coating	0,0111 / 0,0731	78 / 44
NACE+ $CO_2$	Сталь / Steel	0,0832 / 0,143	-
	Сталь с СГФП / Steel with SHP coating	0,0239 / 0,0913	71 / 36

**Таблица 2. Изменение исходных ( $\theta_0$ ) краевых углов смачивания СГФ покрытия после выдержки в среде ( $\theta_1$ ) и хранении на воздухе в течение 14 ( $\theta_2$ ), 28 ( $\theta_3$ ), 35 суток ( $\theta_4$ )**

**Table 2. Change in the initial ( $\theta_0$ ) contact angles of wetting of the SHP coating after exposure to the medium ( $\theta_1$ ) and storage in air for 14 ( $\theta_2$ ), 28 ( $\theta_3$ ), 35 ( $\theta_4$ ) days**

Среда / Medium	Фаза / Phase	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
$NaCl+CO_2$	Газ / Gas	157	154	155	155,4	155,9
	Жидкость / Liquid	155	130	137	142,8	143
$NACE+CO_2$	Газ / Gas	156	148	151,9	155	155,6
	Жидкость / Liquid	155	123	128	136,2	139



**Рис. 5. Изображение капель воды на СГФ покрытии: а – исходное  $\theta = 156^\circ$ , б – через 10 суток экспозиции в газовой фазе раствора NACE +  $CO_2$ ,  $\theta = 148^\circ$  и с – после 35 дней выдержки на воздухе  $\theta = 155,6^\circ$**

**Fig. 5. Image of water droplets on the SHP coating: a – initial  $\theta = 156^\circ$ , b – after 10 days of exposure to the gas phase of the NACE +  $CO_2$  solution  $\theta = 148^\circ$  and c – after 35 days of exposure to air  $\theta = 155,6^\circ$**

их сред, повысилась гидрофобность, но супергидрофобность не восстановилась (табл. 2).

Представляет интерес проведение коррозионных испытаний стали с исследуемым СГФ покрытием в жидкой и газовой фазах растворов  $SO_2$ , поскольку этот оксид серы присутствует практически в любой атмосфере:  $ПДК_{c.c.} = 0,05 \text{ мг}/\text{м}^3$ ,  $ПДК_{p.z.} = 10 \text{ мг}/\text{м}^3$  [11]. Большие концентрации  $SO_2$  в воздухе наблюдаются в заводских атмосферах, вблизи производств, связанных с сульфидаами металлов. Коррозионная агрессивность  $SO_2$  по отношению к металлам особенно проявляется при высокой влажности воздуха, что связывается с подкислением среды и его участием в качестве катодного деполяризатора. Вследствие растворимости  $SO_2$  в воде, его исходная концентрация отличается от равновесной. Как показано в [12], при исходной концентрации  $SO_2$ , равной 1 и 3 об.%, его равновесная концентрация в воздухе равна 0,001 и 0,008 об.% при  $pH$  в жидкой фазе, равном 3,5 и 2,8 соответственно, вследствие образования сернистой кислоты при взаимодействии  $SO_2$  с водой:



В табл. 3 приведены величины скорости коррозии стали и защитного эффекта

супергидрофобного покрытия в жидкой и газовой фазах в присутствии  $SO_2$ . Видно, что скорость коррозии незащищенной стали в газовой фазе выше, чем в жидкой, а при наличии покрытия – ниже при 1% исходной концентрации  $SO_2$  и незначительно выше при 3%. Защитная эффективность покрытия достаточно высокая (94%) в газовой фазе при более низкой концентрации  $SO_2$ . В жидкой фазе при обеих концентрациях величина  $Z$  незначительная.

Величина краевого угла смачивания уменьшилась незначительно после эксперимента в газовой фазе с более низкой концентрацией  $SO_2$  с сохранением супергидрофобности, при более высокой концентрации оксида серы снижение  $\theta$  привело к потере супергидрофобности, но сохранению гидрофобности. После эксперимента в жидкой фазе растворов  $SO_2$  контактные углы на СГФ покрытии уменьшились на 21 и 39° при 1 и 3% концентрациях оксида серы. Это привело к потере супергидрофобности, однако гидрофобность сохранилась (табл. 4). При последующей экспозиции на воздухе на образцах после газовой фазы 3% раствора  $SO_2$  супергидрофобность восстановилась ( $\theta = 153,3^\circ$ ). У образцов после жидкой фазы обоих растворов контактный угол значительно увеличился, но супергидрофобность не восстановилась (табл. 4).

**Таблица 3. Скорость коррозии и защитный эффект СГФ покрытия на стали Ст3 в газовой (числитель) и жидкой (знаменатель) фазах  $SO_2$  растворов при продолжительности 240 час**

**Table 3. Corrosion rate (K) of steel samples without and with SHP coating and its protective effect (Z) in the gas (numerator) and liquid (denominator) phases of  $SO_2$  solution for 10 days**

$C(SO_2)$ , исх / $C(SO_2)$ , равн, об.%	Образец / Sample	$K, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}) / K, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$Z, \%$
1,0 / 0,001	Сталь / Steel	0,118 / 0,058	-
	Сталь с СГФП / Steel with SHP coating	0,0066 / 0,0451	94 / 22
3,0 / 0,008	Сталь / Steel	0,226 / 0,092	-
	Сталь с СГФП / Steel with SHP coating	0,0839 / 0,0812	63 / 12

**Таблица 4. Изменение исходных ( $\theta_0$ ) краевых углов смачивания СГФ покрытия после выдержки в среде с  $SO_2$  ( $\theta_1$ ) и хранении на воздухе в течение 14 ( $\theta_2$ ), 28 ( $\theta_3$ ), 35 суток ( $\theta_4$ )**

**Table 4. Change in the initial ( $\theta_0$ ) contact angles of wetting of the SHP coating after exposure to the medium ( $\theta_1$ ) and storage in air for 14 ( $\theta_2$ ), 28 ( $\theta_3$ ), 35 ( $\theta_4$ ) days**

Среда / Medium	Фаза / Phase	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
1,0 / 0,001	Газ / Gas	155	154	155,3	155,4	155,2
	Жидкость / Liquid	155	134	137,8	140	140,9
3,0 / 0,008	Газ / Gas	155	142	147,6	152,7	153,3
	Жидкость / Liquid	155	116	126,7	131,8	133,7

Изображение капель воды на поверхности СГФ покрытия после выдержки образцов в газовой и жидкой фазах 3% раствора  $SO_2$  приведено на рис. 6. Внешний вид изображений свидетельствует о большей агрессивности жидкого раствора.

Таким образом, после испытаний в газовой фазе исследуемых растворов состояние супергидрофобного покрытия изменяется незначительно и супергидрофобность восстанавливается после выдержки на воздухе. Можно полагать, что причиной восстановления супергидрофобности является адсорбция из воздуха углеводородов, как это было показано в [9], когда РФЭС анализ, выполненный авторами после выдержки на воздухе электроосажденного  $Ni-Co$  покрытия, показал

наличие на поверхности фрагментов углеводородов  $C-C-C-H$ ,  $COOH/C-O$ , при этом возникла супергидрофобность покрытия.

#### **Электрохимические исследования защитной эффективности СГФ покрытия**

##### **Поляризационные измерения**

На рис. 7 приведены ПК, полученные на электроде без покрытия и с покрытием через разные промежутки времени нахождения в растворе  $NaCl$  (50 г/л).

После 15-минутного нахождения в растворе потенциал коррозии  $E_{\text{кор}}$  незащищенной стали близок к -0,42 В, коррозия металла протекает в активном состоянии. Тафелевские коэффициенты наклона  $b_a$  и  $b_k$  равны соответственно 0,030 и 0,075, а  $i_{\text{кор}} = 0,4196 \text{ A}/\text{m}^2$ .  $E_{\text{кор}}$  стали с

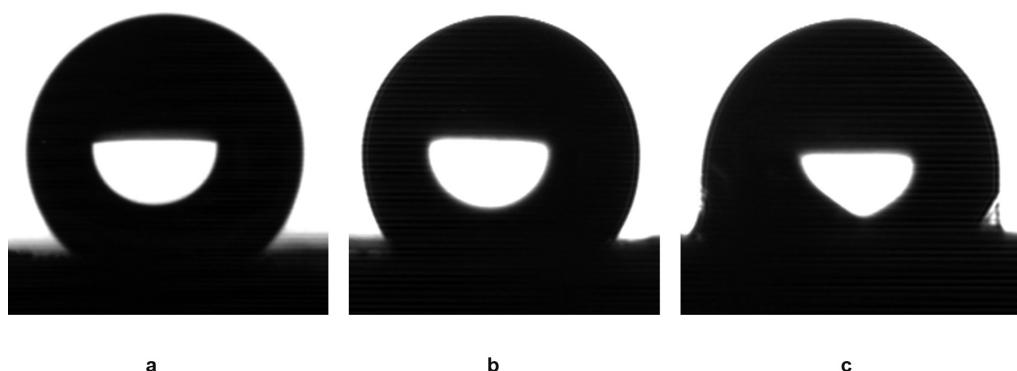


Рис. 6. Изображение капель воды на поверхности СГФ покрытия: а – исходное  $\theta=155^\circ$ , б – после выдержки в газовой фазе 3% раствора  $SO_2$   $\theta=142^\circ$ , в – после соответствующей жидкой фазы  $\theta=116^\circ$

Fig. 6. Image of water droplets on the surface of the SHP coating: initial  $\theta=155^\circ$  (a), after exposure to the gas  $\theta=142^\circ$  (b) and liquid  $\theta=116^\circ$  (c) phases of the 3%  $SO_2$  solution

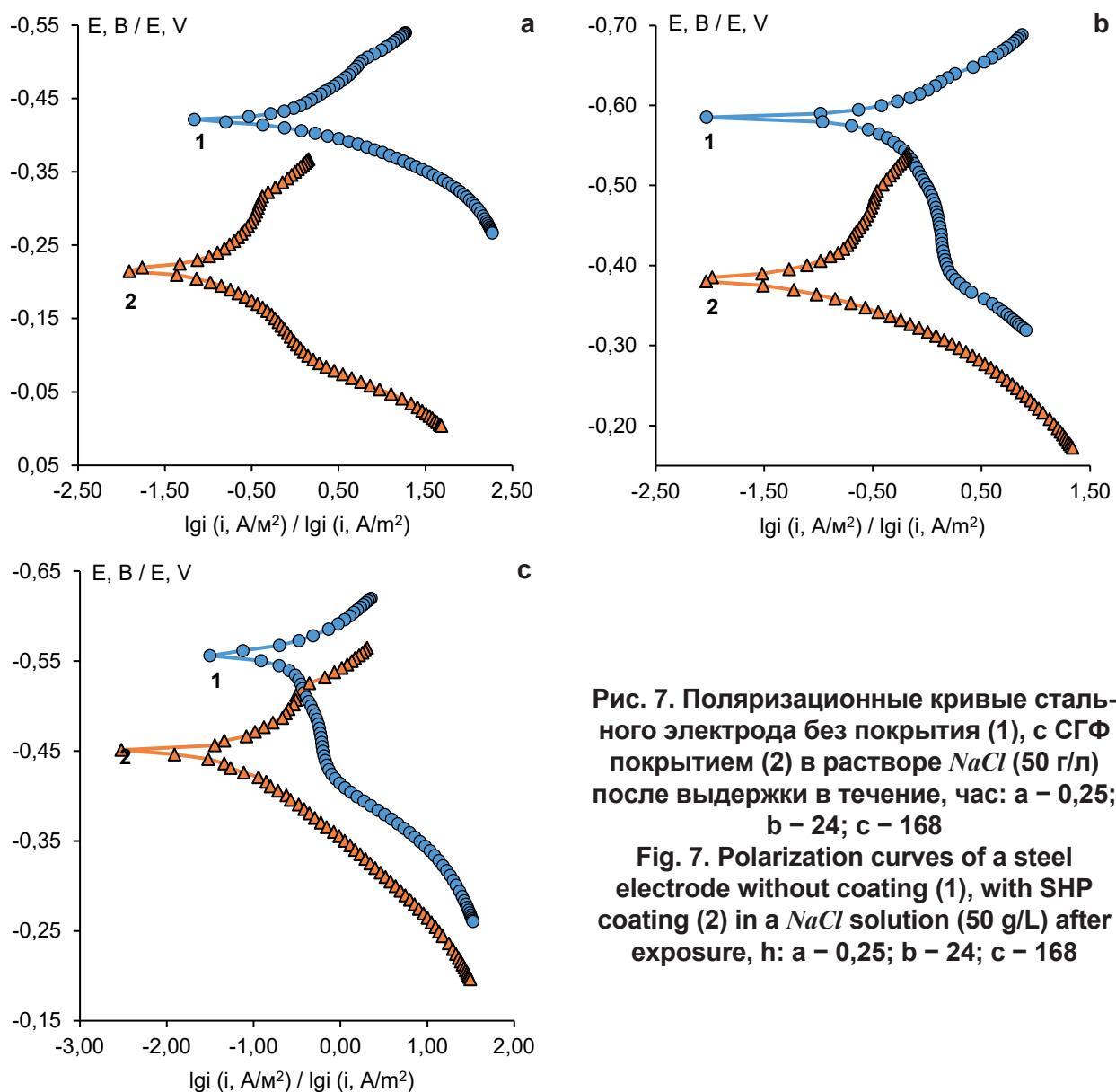


Рис. 7. Поляризационные кривые стального электрода без покрытия (1), с СГФ покрытием (2) в растворе  $NaCl$  (50 г/л) после выдержки в течение, час: а – 0,25; б – 24; в – 168

Fig. 7. Polarization curves of a steel electrode without coating (1), with SHP coating (2) in a  $NaCl$  solution (50 g/L) after exposure, h: a – 0,25; b – 24; c – 168

СГФ покрытием через 15 мин после погружения в раствор близок к -0,22 В при  $b_a$  и  $b_k$ , равных соответственно 0,078 и 0,070 В,  $i_{kor} = 0,0608 \text{ A/m}^2$ . Защитный эффект  $Z$  СГФП равен 86 % (рис. 7а, кривые 1, 2). При сравнении кривых 1 и 2 на рис. 7а видно, что при наличии покрытия сильно заторможена анодная реакция по сравнению с незащищенной сталью, что видно по большому смещению анодных кривых друг относительно друга.

После 24-часовой выдержки в той же среде  $E_{kor}$  электрода без покрытия снижается до -0,58 В, а с СГФ покрытием - до -0,38 В (рис. 7б, кривые 1 и 2). По-прежнему на электроде с покрытием заторможен анодный процесс.  $i_{kor}$  электрода без покрытия уменьшилась до  $0,174 \text{ A/m}^2$ , а с покрытием до  $0,0455 \text{ A/m}^2$ . Это привело к снижению величины  $Z$  СГФ покрытия до 74 %.

Последующая выдержка электродов в солевой среде в течение 6 суток характеризуется колебаниями  $E_{kor}$  в пределах -0,55...-0,56 В для незащищенного образца, а для

образца с покрытием наблюдается смещение  $E_{kor}$  в отрицательную область и через 168 ч он принимает значение -0,45 В (рис. 7с, кривая 2).  $E_{kor}$  электрода без покрытия к этому времени имеет величину -0,56 В (рис. 7с, кривая 1). По-прежнему на электроде с покрытием заторможен анодный процесс по сравнению с незащищенной сталью, однако разница в расположении ПК значительно уменьшилась по сравнению с 24 часовой ситуацией. При  $i_{kor} = 0,1303 \text{ A/m}^2$  на стальном электроде и  $0,0427 \text{ A/m}^2$  на электроде с покрытием защитная эффективность покрытия снизилась до 67 %.

Таким образом, СГФ покрытие на стальном электроде при его непрерывном нахождении в солевой среде в течение 168 час и периодической поляризации в анодном и катодном направлениях проявляет к концу периода достаточно высокий защитный эффект.

#### Импедансные исследования

На рис. 8 приведены годографы, изме-

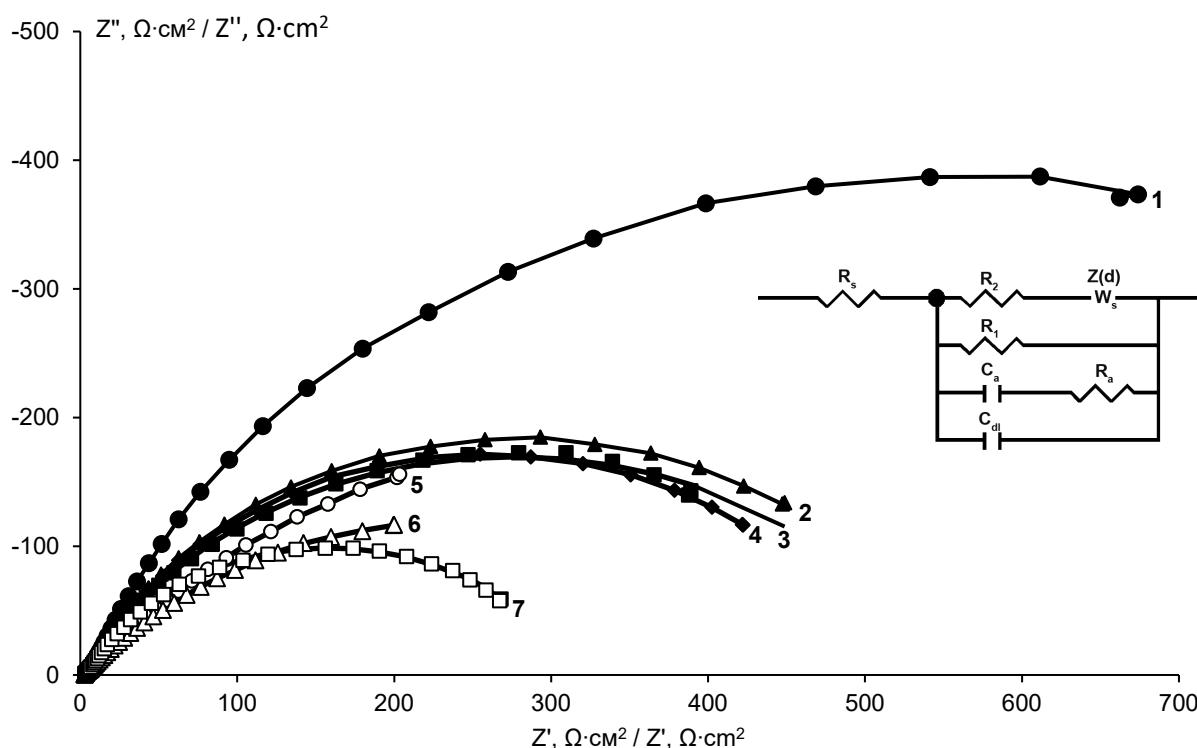


Рис. 8. Диаграмма Найквиста стального электрода с СГФ покрытием в растворе 50 г/л  $NaCl$  при  $E_{kor}$  и эквивалентная схема, моделирующая поведение электрода. Время экспозиции в растворе, час: 1 – 0,25; 2 – 24; 3 – 48; 4 – 72; 5 – 96; 6 – 120; 7 – 168

Fig. 8. Nyquist diagram of a steel electrode with SHP coating in a medium of 50 g/L  $NaCl$  at  $E_{cor}$  and equivalent circuit simulating the behavior of a steel electrode in test solution. Exposure time of the electrode to the solution, hours: 1 – 0,25; 2 – 24; 3 – 48; 4 – 72; 5 – 96; 6 – 120; 7 – 168

**Таблица 5. Численные значения элементов эквивалентной схемы для стального электрода с СГФ покрытием в растворе  $NaCl$  (50 г/л)**

**Table 5. Numerical values of elements of the equivalent circuit of the steel electrode with SHP coating in  $NaCl$  solution (50 g/L)**

Элемент / Element	Продолжительность экспозиции образцов в растворе, ч / Duration of sample exposure in solution, h						
	0,25	24	48	96	120	144	168
$R_s$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$ / $R_s$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$	4	3,3	3,1	3,3	2,7	2,7	3,1
$R_2$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$ / $R_2$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$	5,9	6,4	5,2	7,2	3,6	2,6	4,7
$R_d$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$ / $R_d$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$	11274	7351	4597	7217	1630	1713	5318
$\tau_d$ , с	41,1	28,4	24,9	26,7	47,7	47,8	28,3
$p_d$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7
$R_1$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$ / $R_1$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$	1106	551,5	550,7	507,9	764,7	472,7	312,4
$C_a$ , $\text{мкФ}/\text{см}^2$ / $C_a$ , $\mu\text{F}/\text{см}^2$	133,6	112,5	97,6	116,8	77,0	72,7	98,2
$R_a$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$ / $R_a$ , $\Omega \cdot \text{см}^2$	2,2	2,2	2,0	2,5	2,1	1,6	2,0
$C_{dl}$ , $\text{мкФ}/\text{см}^2$ / $C_{dl}$ , $\mu\text{F}/\text{см}^2$	69,4	69,3	72,7	76,6	79,5	72,7	68,5
$s$ , %	3	3,4	3,9	2,9	3	3,2	3,5
$R_p$	1007,2	513,0	491,9	474,5	520,9	370,6	295,1
$Z$ , %	91,6	83,4	76,9	74,3	84,5	82,0	72,3

ренные на Ст3 электроде с СГФ покрытием в растворе  $NaCl$  (50 г/л), и эквивалентная схема, моделирующая поведение электрода. В эквивалентной схеме  $R_1$  – сопротивление переноса заряда в анодной реакции, цепочка  $R_a - C_a$  описывает импедансный ответ многостадийной реакции ионизации железа. Процесс катодного восстановления кислорода описывается схемой Эршлера-Рендлса с последовательно соединенными сопротивлением  $R_2$  и диффузионным импедансом  $Z_d$ .

Радиус годографов уменьшается с увеличением времени выдержки электрода в растворе, что свидетельствует об увеличе-

нии скорости коррозии. На основе численных значений элементов эквивалентной схемы (табл. 5) рассчитано поляризационное сопротивление  $R_p$  по формуле:

$$R_p = [R_1 \cdot (R_2 + R_d)] / (R_1 + R_2 + R_d), \quad (3)$$
 используемое для расчета защитного эффекта СГФ покрытия (табл. 5):

$$Z, \% = 100 (R_{p,C\Gamma\Phi\Gamma} - R_{p,0}) / R_{p,C\Gamma\Phi\Gamma}, \quad (4)$$

где  $R_{p,C\Gamma\Phi\Gamma}$  и  $R_{p,0}$  – поляризационное сопротивление импеданса в присутствии и в отсутствие СГФ покрытия на образцах стали соответственно.

Из табл. 5 следует, что сопротивление переноса заряда в катодной реакции  $R_2$  значительно меньше сопротивления массопереноса  $R_D$ . Это свидетельствует о восстановлении кислородного деполяризатора с преобладанием диффузионных ограничений.  $R_d$ ,  $\tau_d$  и  $p_d$  – параметры диффузионного импеданса:

$$Z_d = R_d \frac{\tanh(j\omega\tau_d)^{p_d}}{(j\omega\tau_d)^{p_d}}. \quad (5)$$

Параметр  $p_d$  заметно отличается от 0,5, что, вероятно, отражает неоднородность диффузионного слоя. Сопротивление переноса заряда в анодной реакции  $R_1$  значительно выше  $R_2$ , что говорит об анодном контроле процесса и согласуется с данными поляризационных измерений.  $R_1$  имеет тенденцию к снижению во времени, свидетельствуя о росте скорости растворения электрода с увеличением времени экспозиции. Приведенные в табл. 5 величины защитной эффективности СГФ покрытия на стальных образцах удовлетворительно согласуются с соответствующими величинами, рассчитанными на основе поляризационных кривых.

### Заключение

Защитная эффективность супергидрофобного покрытия, полученного на Ст3 электроде на основе электроосаждения Cu и Zn с последующей модификацией в растворе миристиновой кислоты, с контактным углом  $157 \pm 2^\circ$ , изучена гравиметрическим методом в ряде сред в течение 240 часов.

Супергидрофобное покрытие проявляет 100% защитный эффект  $Z$  при экспозиции образцов в условиях 100% влажности и дистиллированной воде при практически неизменной величине контактных углов.

Экспозиция стальных образцов с исследуемым СГФ покрытием в газовой фазе растворов  $NaCl$  (50 г/л) +  $CO_2$  и NACE +  $CO_2$  характеризуется защитным эффектом 78 и 71% соответственно. В первом случае сохраняется супергидрофобность, во втором – гидрофобность, однако последующая выдержка на воздухе способствует восстановлению супергидрофобности.

Защитный эффект СГФ покрытия в газовой фазе 1 и 3% растворов  $SO_2$  равен 94 и 64% соответственно. В первом случае со-

храняется супергидрофобность покрытия, во втором – гидрофобность, которая, однако, переходит в супергидрофобность при выдержке на воздухе.

Электрохимические исследования посредством поляризационных измерений и импедансной спектроскопии в растворе  $NaCl$  в течение 168 час показали, что наличие СГФ покрытия обуславливает замедление анодного процесса на электроде по сравнению с незащищенным электродом. Величина  $Z$  покрытия в начальный момент близка к 90% и снижается до 70% через 168 час.

Исследуемое СГФ покрытие может успешно использоваться для защиты стальных изделий от атмосферной коррозии в условиях 100%-ой влажности и наличия высоких концентраций в воздухе  $CO_2$  и  $SO_2$ .

### Литература

1. Li, H., Yu, S., Han, X., Zhang, S., Zhao, Y. A simple method for fabrication of bionic superhydrophobic zinc coating with crater-like structures on steel substrate // J. Bionic Eng. – 2016. – V. 13. – P. 622-630. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(16\)60333-5](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60333-5)
2. Gao H., Lu S., Xu W., Szunerits S., Boukherroub R. Controllable fabrication of stable superhydrophobic surfaces on iron substrates // RSC Adv. – 2015. – V. 5. – P. 40657-40667. doi:10.1039/c5ra02890f
3. Tan J., Hao J., An Z., Liu C. Simple Fabrication of Superhydrophobic Nickel Surface on Steel Substrate via Electrodeposition // Int. J. Electrochem. Sci. – 2017. – V. 12. – P. 40-49. doi:10.20964/2017.01.15
4. Polyakov N.A., Botryakova I.G., Glukhov V.G., Red'kina G.V., Kuznetsov Yu.I. Formation and anticorrosion properties of superhydrophobic zinc coatings on steel // Chemical Engineering Journal. – 2021. – V. 421. – P. 127775. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127775>
5. Li H., Yu S., Han X., Zhao Y. A stable hierarchical superhydrophobic coating on pipeline steel surface with self-cleaning, anticorrosion, and anti-scaling properties. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. – 2016. – V. 503. – P. 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.029>
6. Li H., Yu S., Hu J., Yin X. Modifier-free fabrication of durable superhydrophobic electrodeposited Cu-Zn coating on steel substrate

with self-cleaning, anti-corrosion and anti-scaling properties // *Appl. Surf. Sci.* – 2019. – V. 481. – P. 872-882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.123>

7. Цыганкова Л.Е., Брыксина В.А., Алексина О.А., Шель Н.В. Защитная эффективность оме-празола против сероводородной коррозии углеродистой стали // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 36-44. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4

8. Esmailzadeh S., Khorsand S., Raeissi K. and Ashrafizadeh F. Microstructural evolution and corrosion resistance of SHP electrodeposited nickel films // *Surf. Coat. Technol.* – 2015. – V. 283. – P. 337-346. doi:10.1016/j.surfcoat.2015.11.005

9. Khorsand S., Raeissi K., Ashrafizadeh F., Arenas M.A., Conde A. Corrosion behaviour of super-hydrophobic electrodeposited nickel–cobalt alloy films // *Appl. Surf. Sci.* – 2016. – V. 364. – P. 349-357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.122>

10. Boinovich L.B., Modin E.B., Sayfutdinova A.R., Emelyanenko K.A., Vasiliev A.L. and Emelyanenko A.M. Combination of functional nanoengineering and nanosecond laser texturing for design of superhydrophobic aluminum alloy with exceptional mechanical and chemical properties // *ACS Nano*. – 2017. – V. 11. – P. 10113-10123. doi:10.1021/acsnano.7b04634}

11. Беспамятнов Г.П., Кротов Ю.А. Пределенно-допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л.: Химия, 1985. – 528 с.

12. Tsygankova L.E., Uryadnikov A.A., Rodionova L.D. and Uryadnikova M.N. On the duration of the protective effectiveness of superhydrophobic coatings // *Int. J. Corros. Scale Inhib.* – 2023. – V. 12, no. 3. – P. 1211-1223. doi:10.17675/2305-6894-2023-12-3-23

## References

1. Li, H., Yu, S., Han, X., Zhang, S., Zhao, Y. (2016). A simple method for fabrication of bionic superhydrophobic zinc coating with crater-like structures on steel substrate. *J. Bionic Eng.*, 13, 622-630. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(16\)60333-5](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60333-5)
2. Gao, H., Lu, S., Xu, W., Szunerits, S., Boukherroub, R. (2015). Controllable fabrica-
- tion of stable superhydrophobic surfaces on iron substrates. *RSC Adv.*, 5, 40657-40667. doi:10.1039/c5ra02890f
3. Tan, J., Hao, J., An, Z., Liu, C. (2017). Simple Fabrication of Superhydrophobic Nickel Surface on Steel Substrate via Electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 12, 40-49. doi:10.20964/2017.01.15
4. Polyakov, N. A., Botryakova, I. G., Glukhov, V. G., Red'kina, G. V., Kuznetsov, Yu. I. (2021). Formation and anticorrosion properties of superhydrophobic zinc coatings on steel. *Chemical Engineering Journal*, 421, 127775. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127775>
5. Li, H., Yu, S., Han, X., Zhao, Y. (2016). A stable hierarchical superhydrophobic coating on pipeline steel surface with self-cleaning, anticorrosion, and anti-scaling properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 503, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.029>
6. Li, H., Yu, S., Hu, J., Yin, X. (2019). Modifier-free fabrication of durable superhydrophobic electrodeposited Cu-Zn coating on steel substrate with self-cleaning, anti-corrosion and anti-scaling properties. *Appl. Surf. Sci.*, 481, 872-882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.123>
7. Tsygankova, L. E., Bryksina, V. A., Alekhina, O. A., and Shel, N. V. (2022). Protective efficacy of omeprazole against hydrogen sulfide corrosion of carbon steel. *Theory and practice of corrosion protection*, 27 (4), 36-44. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4 (in Russ.)
8. Esmailzadeh, S., Khorsand, S., Raeissi, K. and Ashrafizadeh, F. (2015). Microstructural evolution and corrosion resistance of SHP electrodeposited nickel films. *Surf. Coat. Technol.*, 283, 337-346. doi:10.1016/j.surfcoat.2015.11.005
9. Khorsand, S., Raeissi, K., Ashrafizadeh, F., Arenas, M.A., Conde, A. (2016). Corrosion behaviour of super-hydrophobic electrodeposited nickel–cobalt alloy films. *Appl. Surf. Sci.*, 364, 349-357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.122>
10. Boinovich, L. B., Modin, E. B., Sayfutdinova, A. R., Emelyanenko, K. A., Vasiliev, A. L. and Emelyanenko, A. M. (2017). Combination of functional nanoengineering and nanosecond laser texturing for design of superhydrophobic aluminum alloy with exceptional mechan-

- ical and chemical properties. *ACS Nano*, 11, 10113-10123. doi:10.1021/acsnano.7b04634}
11. Bespamyatnov, G. P., Krotov, Yu. A. (1985). *Predelno dopustimye kontsentratsii khimicheskikh vestchestv v okruzhayushchei srede (Maximum permissible concentrations of chemical substances in the environment)*. L.: Chemistry. 528 p. (in Russ.)
12. Tsygankova, L. E., Uryadnikov, A. A., Rodionova, L. D. and Uryadnikova, M. N. (2023). On the duration of the protective effectiveness of superhydrophobic coatings. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 12(3), 1211-1223. doi:10.17675/2305-6894-2023-12-3-23

#### Информация об авторах

**Цыганкова Людмила Евгеньевна**, д.х.н., профессор, зав. кафедрой химии, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Родионова Людмила Дмитриевна**, аспирант кафедры химии, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Урядников Александр Алексеевич**, к.х.н., доцент кафедры химии, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Горлов Денис Анатольевич**, студент химического отделения, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Ломакина Ирина Андреевна**, студент химического отделения, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Шель Наталья Владимировна**, д.х.н., профессор кафедры «Химия и химическая технология», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

#### Information about authors

**Liudmila E. Tsygankova**, Doctor of Chemistry, Professor, Head of Department of Chemistry, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Lyudmila D. Rodionova**, postgraduate student of the Department of Chemistry, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Alexander A. Uryadnikov**, Ph.D. in Chemistry, associate professor, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Denis A. Gorlov**, student of Department of Chemistry, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Irina A. Lomakina**, student of Department of Chemistry, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Natalia V. Shel**, Doctor of Chemistry, Professor of «Chemistry and Chemical Technology» Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова,  
Н.В. Шель, Л.Г. Князева, А.Н. Зазуля

#### Защита металлов от атмосферной коррозии масляными покрытиями

Объем издания: 14,5 п.л. (232 стр.)  
Стоимость 520 руб.

В монографии обобщены литературные данные и результаты собственных исследований авторов, проводимых ими более пятнадцати лет и касающихся кинетики реакции восстановления растворенного кислорода и анодной ионизации металлов под тонкими пленками влаги и защитных неметаллических покрытий на основе товарных и отработанных нефтяных и синтетических масел.

Приводится классификация и свойства широкого круга защитных неметаллических составов. Рассматриваются атмосферная коррозия некоторых конструкционных материалов, защитные свойства композиций, содержащих полиамиды, безоксидная пассивация стали азотсодержащими соединениями – компонентами масляных фаз, результаты многолетних промышленных испытаний эффективности некоторых анткоррозионных покрытий подобного рода.

Впервые в отечественной литературе приводятся подобные данные для поли- $\alpha$ -олефиновых синтетических масел и их тонких поверхностных пленок на основе Мобил-1. Сообщаются вязкостнотемпературные и реологические характеристики неингибированных и ингибиционных защитных масляных композиций и тонких пленок, их влаго- и кислородопроницаемость и структура.

Рассматривается кинетика электродных процессов на углеродистой стали, покрытой масляными пленками в нейтральных и кислых хлоридных средах с изменяющейся и постоянной ионной силой. Оцениваются кинетические параметры электродных реакций в подобных условиях.