

**В. С. Фелькер, А. Ф. Дресвянников, И. А. Назарько,  
П. М. Бажин**

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ TiC-NiCr-Al, TiC-NiCr-AlY И TiC-NiCr НА СТАЛИ 3 В УГЛЕКИСЛОТНОЙ СРЕДЕ**

*Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), углекислотная коррозия, защитные покрытия, низкоуглеродистая сталь, карбид титана, коррозионная стойкость, потенциодинамическая поляризация, иттрий, легирующий элемент, композитные материалы, нефтегазовая отрасль.*

*В статье представлены результаты исследования защитных свойств композитных покрытий на основе модифицированного карбида титана для защиты низкоуглеродистой стали 3 от углекислотной коррозии. Объектом исследования являются образцы стали 3 с нанесёнными покрытиями TiC-NiCr-Al, TiC-NiCr-AlY и TiC-NiCr. Методология исследования включала потенциодинамическую поляризацию исследуемых образцов с использованием потенциостата-гальваностата P-2X и трёхэлектродной ячейки. Коррозионная среда моделировалась раствором состава: NaCl (20 г/дм<sup>3</sup>), NaHCO<sub>3</sub> (1 г/дм<sup>3</sup>), CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O (1,2 г/дм<sup>3</sup>), уксусной кислоты (1 г/дм<sup>3</sup>) и Трилона Б (21 г/дм<sup>3</sup>) с насыщением CO<sub>2</sub> в течение 1 часа. В ходе экспериментов установлено, что покрытие TiC-NiCr-AlY демонстрирует наивысшую среди исследуемых покрытий эффективность защиты, достигающую 80,1% при плотности тока коррозии 0,0079 мА/см<sup>2</sup>, что в пять раз ниже показателя непокрытой стали Ст3 (0,0398 мА/см<sup>2</sup>). Покрытия TiC-NiCr-Al и TiC-NiCr продемонстрировали существенно меньшую эффективность защиты на уровне 36,9% и 20,6%, соответственно. Выявлено, что высокая защитная способность покрытия TiC-NiCr-AlY обусловлена синергетическим эффектом карбидной матрицы TiC и оксидного слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, дополнительно легированного иттрием. Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности применения покрытия TiC-NiCr-AlY для защиты оборудования нефтегазовой отрасли в средах с высоким содержанием CO<sub>2</sub>, что позволяет увеличить срок службы металлических конструкций. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых защитных покрытий для эксплуатации в агрессивных средах.*

**V. S. Fel'ker, A. F. Dresvyannikov, I. A. Nazar'ko,  
P. M. Bazhin**

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROTECTIVE PROPERTIES OF TiC-NiCr-Al, TiC-NiCr-AlY, AND TiC-NiCr COATINGS ON STEEL 3 IN A CARBON ACID ENVIRONMENT**

*Keywords: self-propagating high temperature synthesis (SHS), carbon dioxide corrosion, protective coatings, low carbon steel, titanium carbide, corrosion resistance, potentiodynamic polarization, yttrium, alloying element, composite materials, oil and gas industry.*

*The article presents the results of a study of the protective properties of composite coatings based on modified titanium carbide for protecting low-carbon steel 3 from carbon dioxide corrosion. The object of the study is samples of steel 3 with TiC-NiCr-Al, TiC-NiCr-AlY, and TiC-NiCr coatings. The research methodology included potentiodynamic polarization of the samples using a P-2X potentiostat-galvanostat and a three-electrode cell. The corrosive environment was simulated with a solution consisting of NaCl (20 g/dm<sup>3</sup>), NaHCO<sub>3</sub> (1 g/dm<sup>3</sup>), CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O (1.2 g/dm<sup>3</sup>), acetic acid (1 g/dm<sup>3</sup>), and Trilon B (21 g/dm<sup>3</sup>), which was saturated with CO<sub>2</sub> for 1 hour. During the experiments, it was found that the TiC-NiCr-AlY coating demonstrates the highest protection efficiency among the studied coatings, reaching 80.1% at a corrosion current density of 0.0079 mA/cm<sup>2</sup>, which is five times lower than that of uncoated St3 steel (0.0398 mA/cm<sup>2</sup>). The TiC-NiCr-Al and TiC-NiCr coatings demonstrated a significantly lower protection efficiency of 36.9% and 20.6%, respectively. It was found that the high protective capacity of the TiC-NiCr-AlY coating is due to the synergistic effect of the TiC carbide matrix and the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide layer, which is additionally doped with yttrium. The practical significance of the work lies in substantiating the possibility of using the TiC-NiCr-AlY coating to protect equipment in the oil and gas industry in environments with high CO<sub>2</sub> content, which can increase the service life of metal structures. The results obtained can be used in the development of new protective coatings for use in aggressive environments.*

#### **Введение**

Углекислотная коррозия остаётся ключевой проблемой для углеродистых сталей в нефтегазовой отрасли, приводя к ежегодным потерям в \$2–3 млрд только на территории России [1]. Сталь 3, несмотря на низкую стоимость и доступность, крайне уязвима в средах с высоким парциальным давлением CO<sub>2</sub>, где скорость коррозии может достигать 3–5 мм/год [2–5]. Традиционные методы защиты (ингибиторы, катодная защита) не всегда эффективны, что стимулирует разработку композитных покрытий, получаемых, в том числе, с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [6,7]. Та-

кие материалы, включая TiC-NiCr-системы, сочетают высокую устойчивость к агрессивным средам, твёрдость и износостойкость.

Хром в составе покрытия TiC-NiCr повышает жаростойкость материала, увеличивает твёрдость до 15 ГПа и формирует защитную оксидную плёнку на поверхности, которая препятствует коррозии. Однако, в кислой среде хромовая матрица частично растворяется, поэтому для повышения стойкости требуются дополнительные легирующие элементы.

Добавка иттрия в TiC-NiCr-покрытия повышает их эффективность на 43,5% по сравнению с TiC-NiCr-Al. Это связано с образованием и малорастворимых соединений иттрия.

### Методика получения образцов покрытий

Покрытия получали методом электроискрового легирования при использовании электродов, полученных методом свободного СВС-сжатия.[8] Особенности формирования защитных покрытий методом электроискрового легирования описаны в работах [7,9]. Процесс включает следующие этапы:

#### Подготовка смеси

Тщательное перемешивание компонентов в виде соединений металлов и углерода в заданных пропорциях и равномерное распределение реагентов по объему реакционного пространства.

#### Процесс синтеза

Получение композиционных материалов осуществляется на основе метода свободного СВС-сжатия, в котором осуществлено сочетание процессов СВС из исходных порошковых компонентов и высокотемпературного сдвигового деформирования продуктов синтеза. В результате получены компактные пластины, из которых методом электроэрозионной резки изготовлены образцы квадратного сечения размерами 3x3x50 мм.

### Формирование покрытий

В качестве электродов были использованы образцы трех составов, условно обозначенных как: TiC-NiCr, TiC-NiCr-Al и TiC-NiCr-AlY. Методом электроискрового легирования указанными электродами на подложку из стали 3 размерами 20x50 мм наносили защитные покрытия на установке «Корона» при энергии разряда 0,2 Дж. В результате были получены защитные покрытия толщиной 15-20 мкм. Характеристики нанесенных покрытий представлены в таблице 1.

При использовании материала TiC-NiCr для электроискрового легирования (ЭИЛ) в покрытии формируются две фазы: TiC-Ti<sub>0,8</sub>Cr<sub>0,2</sub>C и твердый раствор железа, в который внедрены фазы Cr, Ni, C - Fe[Ni,Cr,C].

При использовании материала TiC-NiCr-Al в процессе ЭИЛ в покрытии формируется дополнительная фаза в виде тройного интерметаллида со стехиометрией - Al<sub>0,5</sub>Ni<sub>3</sub>Ti<sub>0,5</sub>.

**Таблица 1 – Характеристики материала покрытия, полученного методом СВС**

**Table 1 – Characteristics of the coating material, obtained by SHS**

№ образца	Условное обозначение	Фазовый состав материала основы и покрытия	Тип кристаллической решетки	Размер, Å
1	Сталь 3	Fe	кубическая	2,8608
2	TiC-NiCr-AlY	Fe		2,8608
		(Fe <sub>7</sub> Ni <sub>3</sub> )		2,861
		TiC ~		4,306
		(Ti <sub>0,8</sub> Cr <sub>0,2</sub> C)		4,229
		NiCr-Fe-C		3,6
3	TiC-NiCr	Al <sub>0,5</sub> Ni <sub>3</sub> Ti <sub>0,5</sub>		3,589
		Fe		2,8608
		(Fe <sub>7</sub> Ni <sub>3</sub> )		2,861
		TiC ~		4,306
		(Ti <sub>0,8</sub> Cr <sub>0,2</sub> C)		4,229
4	TiC-NiCr-Al	NiCr-Fe-C		3,6
		Fe~	2,8608	
		(Fe <sub>7</sub> Ni <sub>3</sub> )	2,861	
		TiC ~	4,306	
		(Ti <sub>0,8</sub> Cr <sub>0,2</sub> C)	4,229	
		NiCr-Fe-C	3,6	
		Al <sub>0,5</sub> Ni <sub>3</sub> Ti <sub>0,5</sub>	3,589	

В случае применения материала TiC-NiCr-AlY покрытия иттрий может войти в состав твердого раствора железа (Fe[Ni,Cr,C,Y]) или тройного интерметаллида Al<sub>0,5</sub>Ni<sub>3</sub>Ti<sub>0,5</sub>, что дополнительно способствует повышению механических, трибологических свойств и коррозионной стойкости. Количественное содержание сформированных фаз в покрытии достоверно определить не удалось.

### Объект и предмет исследования

Объектом исследования является низкоуглеродистая сталь 3, используемая при изготовлении элементов скважинного оборудования нефтедобычи [10]. Предмет исследования: защитные свойства покрытий TiC-NiCr с добавками алюминия (Al) и иттрия (AlY) [10]. Выбор TiC обусловлен химической

инертностью, а легирование AlY направлено на усиление пассивации за счёт образования стабильных оксидных плёнок алюминия и иттрия. При микролегировании иттрием наблюдается значительное улучшение коррозионной стойкости материала и улучшение общей устойчивости к межкристаллитной коррозии.[11-12]

### Цель и задачи

Цель исследования является оценка защитных свойств покрытий в углекислотной среде (имитате пластовой воды) в зависимости от их состава и структуры.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

—определение электрохимических коррозионных показателей ( $\lg I$ ,  $E_{кор}$ ,  $R_{кор}$ ) методом потенциодинамической поляризации;

— оценка эффективности защитного действия покрытия.

### Методика исследования

Фазовый состав образцов с покрытиями определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Дрон-3 с использованием источника излучения  $CuK\alpha$ . Идентификацию кристаллических фаз осуществляли путем сопоставления полученных экспериментальных значений межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей с эталонными, приведенными в международной картотеке базы PDF-2.

Электрохимические измерения проводили с использованием современного оборудования: потенциостата Р-2Х с разрешением 0,1 мВ и точностью измерения тока  $\pm 0,5\%$ , трёхэлектродной ячейки с хлоридсеребряным электродом сравнения (ХСЭ) ЭСр-10103 и платиновым вспомогательным электродом ЭВА-1. В качестве рабочего электрода использовали пластины стали 3 с нанесенными электроискровым методом покрытиями: TiC-NiCr-Al, TiC-NiCr-AlY и TiC-NiCr. Коррозионную среду моделировали раствором состава: NaCl (20 г/дм<sup>3</sup>), NaHCO<sub>3</sub> (1 г/дм<sup>3</sup>), CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O (1,2 г/дм<sup>3</sup>), уксусная кислота (1 г/дм<sup>3</sup>), Трилон Б (21 г/дм<sup>3</sup>). Перед измерениями раствор насыщали CO<sub>2</sub> в течение 1 часа для имитации среды углекислотной коррозии.[13,14] Поляризационные кривые снимали в диапазоне значений  $\pm 500$  мВ относительно потенциала коррозии при скорости сканирования 2 мВ/с.

Расчёт защитного эффекта покрытия проводили по формуле:

$$Z = \left( 1 - \frac{i_{покр}}{i_{непокр}} \right) \cdot 100\%$$

### Результаты исследования

На основании данных поляризационных измерений (рис.1) получены характеристики значения плотности тока и потенциала коррозии, а также – поляризационное сопротивление покрытий [3].

Таблица 2 – Электрохимические характеристики образцов стали 3 с покрытием, полученным методом СВС, в растворе-имитате пластовой воды

Table 2 – Electrochemical characteristics of steel 3 samples with SHS coatings in a simulated reservoir water solution

№ образца	Состав	Плотность тока коррозии, мА/см <sup>2</sup>	Потенциал коррозии, мВ	Поляризационное сопротивление, Ом	Защитный эффект, %
1	Ст3 без покрытия	0,0398	-560	1,407	0
2	TiC-NiCr-AlY	0,0079	-540	6,8354	80,1
3	TiC-NiCr	0,0316	-520	1,6456	20,6
4	TiC-NiCr-Al	0,0251	-548	2,1833	36,9

Образец с покрытием TiC-NiCr-Al (№4) занимает промежуточное положение по плотности тока коррозии 0,0251 мА/см<sup>2</sup> и защитным эффектом 36,9%

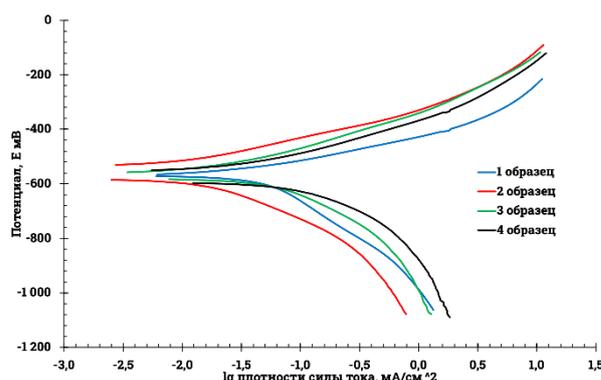


Рис. 1 – Поляризационные диаграммы исследуемых образцов с покрытиями в растворе – имитате пластовой воды: 1 - Ст3 без покрытия, 2 - TiC-NiCr-AlY, 3 - TiC-NiCr, 4 - TiC-NiCr-Al; скорость развертки потенциала – 2 мВ/с

Fig. 1 – Polarization diagrams of the studied samples with coatings in a simulated reservoir water solution: 1 – Steel 3 without coating, 2 - TiC-NiCr-AlY, 3 - TiC-NiCr, 4 - TiC-NiCr-Al; potential sweep rate 2 мВ/с

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 2, демонстрирует существенную разницу в защитных свойствах исследуемых покрытий.

Сталь 3 без покрытия (образец №1) демонстрирует наихудшие показатели с плотностью тока коррозии 0,0398 мА/см<sup>2</sup> и потенциалом коррозии -560 мВ, что свидетельствует о высокой склонности к коррозионному разрушению.

Образец с покрытием TiC-NiCr-AlY (№2) демонстрирует наилучшие характеристики среди всех исследуемых образцов. Плотность тока коррозии составляет 0,0079 мА/см<sup>2</sup>, что в пять раз отличается от аналогичного показателя непокрытой стали. Потенциал коррозии (-540 мВ) смещён в сторону положительных значений, а поляризационное сопротивление достигает наивысшего значения: 6,8354 Ом. При этом защитный эффект покрытия составляет 80,1%.

Образец с покрытием TiC-NiCr (№3) показывает промежуточные результаты: плотность тока коррозии составляет 0,0316 мА/см<sup>2</sup>, а защитный эффект - 20,6%. Потенциал коррозии демонстрирует наименьшее значение среди всех образцов.

среди всех исследуемых образцов. Потенциал коррозии при этом (-548 мВ) близок к таковому образца с иттрием.

На основании результатов исследований можно заключить, что в данном случае имеется чёткая корреляция между составом покрытия и его защитными свойствами. Введение иттрия в состав покрытия TiC-NiCr-AlY значительно повышает защитные характеристики за счёт формирования на поверхности плотного оксидного слоя  $Al_2O_3$  и образования малорастворимых соединений иттрия. Это подтверждается наивысшим значением поляризационного сопротивления и наиболее высоким защитным эффектом среди всех исследуемых покрытий.

Примечательно, что даже базовое покрытие TiC-NiCr обеспечивает определённый уровень защиты, что подтверждает эффективность выбранной системы, как основы для создания защитных слоёв. Однако при этом отсутствие дополнительных легирующих элементов существенно снижает защитные свойства по сравнению с модифицированными составами.

Таким образом, созданное и нанесенное на низкоуглеродистую сталь электроискровым методом покрытие TiC-NiCr-AlY может быть рекомендовано к использованию для защиты, например, насосно-компрессорных труб, сепараторов и ёмкостей, эксплуатируемых в условиях высокого содержания  $CO_2$ . Снижение скорости коррозии в пять раз увеличивает срок службы оборудования на 30–40%, что экономически целесообразно для нефтедобывающих предприятий.

Сталь с покрытием TiC-NiCr-Al может применяться и в средах с умеренной агрессивностью ( $pH > 4.5$ ).

### Выводы

Покрытие TiC-NiCr-AlY демонстрирует наивысший среди испытанных образцов защитный эффект в углекислотной среде за счет комбинированного действия карбидной и оксидной фаз, входящих в состав пассивного слоя [15]. Добавка иттрия в покрытие TiC-NiCr-AlY повышает защитный эффект на 43.5% по сравнению с TiC-NiCr-Al, что делает его перспективным при защите изделий из низкоуглеродистой стали в условиях воздействия углекислотной среды. Аналогичное влияние легирующих элементов на структуру и свойства композитных покрытий исследовано в работе [16]. Последние рекомендованы для применения при защите оборудования нефтегазовой отрасли, эксплуатируемого в условиях высокого содержания  $CO_2$  в природной воде.

### Литература

1. А. А. Коршак, А. М. Шаммазов, *Основы нефтегазового дела*, ООО «ДизайнПолиграфСервис», Уфа, 2005, 528 с.
2. Н. М. Хохлачёва, Е. В. Ряховская, Т. Г. Романова, *Коррозия металлов и средства защиты от коррозии*, ИНФРА-М, Москва, 2022, 118 с.
3. А. Н. Маркин, В. Э. Ткачева, А. Ф. Дресвянников, А. Н. Ахметова, *Коррозия и защита нефтепромышленного оборудования*, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, 2022, 188 с.
4. Под ред. А. М. Сухотина, Л. В. Шрейдера, Ю. И. Арчакова, *Коррозия и защита химической аппаратуры, т.9. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность*, Химия, Санкт-Петербург, 1982, 368 с.

5. И. М. Жарский, Н. П. Иванова, Д. В. Куис, Н. А. Свидуневич, *Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования*, Вышэйшая школа, Минск, 2012, 320 с.
6. Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов, *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*, Москва, МИСИС, 2005, 432 с.
7. М. С. Антипов, П. М. Бажин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, А. О. Жидович, А. М. Столин, *Физическая мезомеханика*, **26**, 4, 117–128 (2023), DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_4\_117.
8. М. С. Антипов, П. М. Бажин, А. П. Чижиков, А. С. Константинов, А. М. Столин, Н. Ю. Хоменко, *Журнал неорганической химии*, **67**, 10, 1498–1504 (2022), DOI: 10.31857/S0044457X22100361.
9. М. С. Антипов, П. М. Бажин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, А. О. Жидович, А. М. Столин, *Физическая мезомеханика*, **26**, 4, 117–128 (2023), DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_4\_117.
10. В. И. Кулик, А. С. Нилов, *Композиционные материалы с металлической матрицей*, БГТУ, Санкт-Петербург, 2020, 69 с.
11. А. А. Попова, *Методы защиты от коррозии. Курс лекций*, Лань, Санкт-Петербург, 2022, 272 с.
12. А. Г. Ракоч, Ю. А. Пустов, А. А. Гладкова, *Коррозия и защита металлов: газовая коррозия металлов*, МИСИС, Москва, 2013, 56 с.
13. А. Н. Маркин, В. Э. Ткачева, *Нефтепромышленное дело*, **637**, 1, 28–32 (2022), DOI: 10.33285/0207-2351-2022-1(637)-28-32.
14. Ю. А. Пучков, М. Р. Орлов, С. Л. Березина, *Теория коррозии и методы защиты металлов*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2014, 67 с.
15. В. В. Кравцов, О. Р. Латыпов, О. А. Макаренко, И. Г. Ибрагимов, *Коррозия и защита нефтезаводского и нефтехимического оборудования*, Химия, Москва, 2010, 344 с.
16. М. S. Antipov, A. S. Ivanov, A. O. Sivakova, *Phys. Metals Metallogr.* **126**, 42–47 (2025), DOI: 10.1134/S0031918X24601082.

### References

1. A. A. Korshak, A. M. Shammazov, *Fundamentals of Oil and Gas Business*, Designpoligrafservice LLC, Ufa, 2005, 528 p.
2. N. M. Hohlachbava, E. W. Russian, T. Mr. Romanova, *Corrosion of metals and corrosion protection products*, INFRA-M, Moscow, 2022, 118 p.
3. A. N. Markin, V. E. Tkacheva, A. F. Dressvyannikov, A. N. Akhmetova, *Corrosion and Protection of Oilfield Equipment*, Kazan National Research Technological University, Kazan, 2022, 188 p.
4. Ed. A. M. Sukhotina, L. V. Schreuder, Y. I. Archakova, *Corrosion and protection of chemical equipment, vol. Petroleum refining and petrochemical industry*, Chemistry, St. Petersburg, 1982, 368 p.
5. I. M. Zharsky, N. P. Ivanova, D. V. Kuis, N. A. Svidunovich, *Corrosion and protection of metal structures and equipment*, Higher School, Minsk, 2012, 320 p.
6. B. A. Kolachev, V. I. Elagin, V. A. Livanov, *Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys*, Moscow, MISIS, 2005, 432 p.
7. M. S. Antipov, P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, A. O. Zhidovich, A. M. Stolin, *Physical Mesomechanics*, **26**, 4, 117–128 (2023), DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_4\_117.
8. M. S. Antipov, P. M. Bazhin, A. P. Chizhikov, A. S. Konstantinov, A. M. Stolin, N. Yu. Khomenko, *Journal of Inorganic Chemistry*, **67**, 10, 1498–1504 (2022), DOI: 10.31857/S0044457X22100361.

9. M. S. Antipov, P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, A. Oh. Zhidovich, A. M. Stolin, *Physical Mesomechanics*, 26, 4, 117–128 (2023), DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_4\_117.
10. V. I. Kulik, A. S. Nilov, *Compositional materials with metal matrix*, BSTU, St. Petersburg, 2020, 69 p.
11. A. A. Popova, *Methods of corrosion protection. Lecture Course*, Lan, St. Petersburg, 2022, 272 p.
12. A. G. Rakoc, Y. A. Pustov, A. A. Gladkova, *Corrosion and protection of metals : gas corrosion of metals*, MISIS, Moscow, 2013, 56 p.
13. A. N. Markin, V. E. Tkacheva, *Neftepromyslovoe delo*, 637, 1, 28-32 (2022), DOI: 10.33285/0207-2351-2022-1(637)-28-32.
14. Yu. A. Puchkov, M. R. Orlov, S. L. Berezina, *Theory of corrosion and methods of protection of metals*, MSTU them. N.E. Bauman, Moscow, 2014, 67 p.
15. V. V. Kravtsov, O. R. Latypov, O. A. Makarenko, I. G. Ibragimov, *Corrosion and protection of oil refinery and petrochemical equipment*, Chemistry, Moscow, 2010, 344 p.
16. M. S. Antipov, A. S. Ivanov, A. O. Sivakova, *Phys. Metals Metallogr.* 126, 42–47 (2025), DOI: 10.1134/S0031918X24601082.

---

© **В. С. Фелькер** – аспирант кафедры Аналитической химии, сертификации и менеджмента качества (АХСМК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, vladimirfelker1102@gmail.com; **А. Ф. Дресвянников** – д-р хим. наук, проф. кафедры АХСМК, КНИТУ, alfedr@kstu.ru; **И. А. Назарько** – аспирант кафедры Нанотехнологий и микросистемной техники, Российский университет дружбы народов (РУДН); младший научный сотрудник, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМПМ РАН), Москва, Россия; **П. М. Бажин** – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе ИСМПМ РАН; профессор РУДН, Черноголовка, Россия.

© **V. S. Fel'ker** – PhD-student of the Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management (ACSQM), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, vladimirfelker1102@gmail.com ; **A. F. Dresvyannikov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor of the ACSQM department, KNRTU, alfedr@kstu.ru ; **I.A. Nazar'ko** – PhD-student at the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering at RUDN University; Junior Research Fellow, Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMPMS RAS), Moscow, Russia; **P. M. Bazhin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Deputy Director for Scientific Work at ISMPMS RAS; Professor at RUDN University, Chernogolovka, Russia.

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.01.26

Дата принятия рукописи в печать – 08.02.26