

О МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

И. Г. Жихарева¹, В. В. Шмидт^{1,2}, Д. В. Денисенко^{1,3}, В. П. Щипанов¹,
А. Д. Федоров¹, А. И. Неустроев¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, Тюмень, Россия

³ ПАО «Тюменский проектный и научно-исследовательский институт нефтяной и газовой промышленности имени В. И. Муравленко», Тюмень, Россия

MECHANISMS OF FORMATION OF NANOSTRUCTURED ELECTROLYTIC COATINGS Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr WITH FUNCTIONAL PROPERTIES

Irina G. Zhikhareva¹, Vadim V. Schmidt^{1,2}, Denis V. Denisenko^{1,3}, Vladimir P. Shchipanov¹, Alexander D. Fedorov¹, Anton I. Neustroev¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A. I. Proshlyakov, Tyumen, Russia

³ PJSC "Tyumen Design and Research Institute of Oil and Gas Industry named after V. I. Muravlenko", Tyumen, Russia

Аннотация. Развитие современной индустрии невозможно без разработки новых материалов и технологий. В машиностроении одними из самых востребованных являются наноструктурные, в частности, электролитические покрытия. Целью данной работы является изучить различные механизмы получения гальванических сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr и их взаимосвязь с заданными универсальными физико-механическими свойствами. Сплав Fe-Ni характеризуется высокой микротвердостью и коррозионной стойкостью в морской воде, низкой хладноломкостью; Co-Mn – заданным фазовым составом (α -Co $\gg$ α -Mn, аморфно-метастабильная фаза $\text{Co}(\text{OH})_2$); Ni-Cr – высокой микротвердостью покрытия, заданным фазовым составом. Основные методы получения:

Abstract. The evolution of modern industry is impossible without the development of new materials and technologies. Nanostructured coatings, in particular electrolytic coatings, are among the most demanded in mechanical engineering. The purpose of this work was to study the different mechanisms of obtaining Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr galvanic alloys and their relationship with the specified universal physical and mechanical properties. Fe-Ni alloy is characterized by high microhardness and corrosion resistance in sea water, low cold brittleness; Co-Mn – by a specified phase composition (α -Co $\gg$ α -Mn, amorphous and metastable phase $\text{Co}(\text{OH})_2$); Ni-Cr – by high coating microhardness, specified phase composition. The main methods of production: high-frequency

высокочастотный переменный ток – для сплавов Fe-Ni и Co-Mn; введение специальной добавки (карбамида или H-кислоты) для сплава Ni-Cr. Основные механизмы получения сплавов: Fe-Ni за счет фазового перехода $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \epsilon\text{-Fe}$; Co-Mn с помощью высокочастотного переменного тока и добавки карбамида, обеспечивающей заданный фазовый состав; Ni-Cr с помощью стационарного метода добавки H-кислоты (высокохромистого сплава 68 масс. % Cr) и карбамида (низкохромистого сплава 25 масс. % Cr). Рекомендованные области применения для гальванопокрытий: Fe-Ni – для защиты нефтегазодобывающего оборудования, работающего в условиях Арктики; Co-Mn – в модуляционных системах и в качестве нанокатализатора в реакции синтеза Фишера – Тропша; Ni-Cr – для коррозионностойких защитных покрытий в нефтехимии и для резистивных элементов.

Ключевые слова: новые покрытия, новые фазы материалов, гальванические покрытия, фазовые переходы, наноструктура, механизмы фазового перехода, сплавы

Для цитирования: О механизмах образования наноструктурных электролитических покрытий Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr с функциональными свойствами / И. Г. Жихарева, В. В. Шмидт, Д. В. Денисенко [и др.]. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-96-103. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 96–103.

For citation: Zhikhareva, I. G., Schmidt, V. V., Denisenko, D. V., Shchipanov, V. P., Fedorov, A. D., & Neustroev, A. I. (2023). Mechanisms of formation of nanostructured electrolytic coatings Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr with functional properties. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 96-103. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-96-103.

Введение

Современные тенденции развития технологических процессов требуют использования новых материалов. Одними из самых перспективных являются наноматериалы, обладающие ценными группами свойств, определяющими их долговечность в процессе эксплуатации. Последнее во многом зависит от способа получения частиц, размеры которых не превышают 100 нм. Актуальность исследования наноструктурных материалов связана с установлением прямой зависимости размеров нанокластеров с важ-

alternating current for Fe-Ni and Co-Mn alloys; introduction of a special additive (carbamide or H-acid) for Ni-Cr alloy. The main mechanisms are: Fe-Ni due to phase transition $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \epsilon\text{-Fe}$; Co-Mn by means of high-frequency alternating current and carbamide addition, providing a specified phase composition; Ni-Cr by means of stationary method of addition of H-acid (high-chromium alloy of 68 mass percent of Cr) and carbamide (low-chromium alloy of 25 mass percent of Cr). Recommended uses for electroplating: Fe-Ni – for protection of oil and gas production equipment in the Arctic; Co-Mn – in modulation systems and as a nanocatalyst in the Fischer-Tropsch synthesis reaction; Ni-Cr – for corrosion-resistant protective coatings in petrochemistry and for resistive elements.

Key words: new coatings, new phases of materials, electroplating coatings, phase transitions, nanostructure, phase transition mechanisms, alloys

нейшими функциональными свойствами. Важно уметь классифицировать основные механизмы образования наноструктуры и прогнозировать свойства, на которые они окажут максимальное влияние.

Одной из важнейших технологий, обеспечивающих научно-технический прогресс в начале XXI века, является нанотехнология. Исследованию кластеров монокристаллов посвящено большое число работ [1–3]. В гальванотехнике перспективными наноструктурами являются некристаллические [4], металлические матрицы,

содержащие дисперсную фазу [5], наномасштабные частицы, размеры которых менее 100 нм [6], полученные с участием сильных ингибиторов. В статье [7] авторы описывают, как ведут себя наноструктуры при электрокристаллизации никеля в присутствии сильного ингибитора.

В наноматериалах часто наблюдается зависимость физических, механических и химических свойств от размера составляющих их частиц. Данные характеристики можно обнаружить с помощью магнитных свойств и магнитных фазовых переходов [8].

Объект и методы исследования

Цель работы: изучить влияние методов получения покрытий сплавами Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr на механизм образования наноструктуры и связь механизма с конкретными функциональными свойствами исследуемых материалов.

Основные требования, которым должны соответствовать сплавы:

1) Fe-Ni – высокая микротвердость и сопротивляемость коррозии в морской воде и солевой среде, низкий порог хладноломкости, наличие наноструктуры и зависимости физических, механических и химических свойств наноматериала от размера составляющих его частиц;

2) Co-Mn – высокое содержание фазы α -Co, наноструктура, наличие регулируемой концентрации аморфно-метастабильной фазы (АМФ) $\text{Co}(\text{OH})_2$;

3) Ni-Cr – высокая твердость отдельных участков микроструктуры материала, наноструктурность, заданный перечень фаз, который есть в данном сплаве, и химический состав.

Задачи решались за счет: 1) нового способа получения сплавов Fe-Ni, Co-Mn с помощью высокочастотного переменного тока (ВПТ); 2) использования специальных добавок (карбамида,

Н-кислоты) для получения сплава Ni-Cr; 3) использования регулируемого количества аморфизированной фазы для получения сплава Co-Mn.

Покрyтия получены из простых водных электролитов при стационарных условиях ($P = 0.1$ МПа, $T = 298$ К) [9]. Перечень фаз, который есть в данных сплавах, определяли при помощи рентгеновского дифрактометра D2 Phaser, применяя излучения Co-K α , Fe фильтры на отражение, фокусировки по Брэггу – Брентано. Исследование параметров элементарных ячеек фаз проводилось в области углов $2\theta = 20^\circ\text{--}120^\circ$ с точностью 0.002 нм. Результаты установления количества фаз в исследуемом образце, их качественный и количественный анализ сопоставлялись с картотекой COD. Исследование поверхностной структуры покрытий и наноструктуры проводилось с помощью зондового атомно-силового микроскопа (АСМ) NTegra Aura (ООО «НТ-МДТ», Россия) полуконтактным методом со сканированием образца. Латеральное разрешение сканирования микроскопа составляет не менее 1 нм, разрешение по высоте – не менее 0.5 нм. Исследование микроструктуры, химического состава подповерхностных слоев проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LV (Япония) с рентгеноспектральными анализаторами, разрешение до 1.2 нм. Погрешность измерения в определении содержания элементов ± 0.2 масс. %. Определение микротвердости проводили методом дюрометрического анализа с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке на индентор 20–50 г. Погрешность измерений 5–7 %, согласно ГОСТ 9450-76¹.

Экспериментальная часть

Осаждение проводилось из простых сульфатных и хлоридно-сульфатных электролитов. Исследовались химический и фазовый состав, микро-

¹ ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников = Measurements microhardness by diamond instruments indentation : государственный стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09.01.76 г. № 68 : дата введения 01.01.1977 / Разработан и внесен Академией наук СССР // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869> (дата обращения: 14.06.2023).

Таблица 1
Table 1

Химический и фазовый состав сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr
Chemical and phase composition of Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys

№	Сплав. Метод получения. Условие	Химическое содержание элементов, %	Фазовый состав		Размер нанокластеров, нм	Толщина δ , мкм
			Фазы	Масс. %		
1	Fe-Ni ВПТ $f = 5$ кГц	87–13	α -Fe ϵ -Fe	77 23	10–12	2–1 500
2	Fe-Ni ВПТ $f = 9$ кГц	84–16	α -Fe ϵ -Fe	68 32	– 10	2–1 500
3	Co-Mn ВПТ о-АСК	97.5–2.5	α -Co β -Co α -Mn Co(OH)_2	96 – 2.3 1.5	25–30	2–10
4	Co-Mn СМ о-АСК	99.1–0.9	α -Co β -Co α -Mn Co(OH)_2	74 20 1.2 3.8	50–80	2–6
5	Ni-Cr СМ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	75–25	β -Ni NiO, АМФ	89 3.3 7.6	50–80	20–40
6	Ni-Cr СМ Н-кислота	38–62	α -Cr β -Ni CrO_3	67 28 3.5	80–100	20–50

структура, наноструктура и некоторые физические свойства (таблица 1). Химическое содержание металла-растворителя во всех случаях предельно высокое (до 99.1 масс. %). Это во многом определяет и фазовый состав.

Исключение составляет появление новой ϵ -фазы для сплава Fe-Ni. При стационарных условиях она не образуется. Наноструктура получена

для всех исследованных сплавов (рис. 1–3), но размерные эффекты обнаружены главным образом для покрытий сплавом Fe-Ni (таблица 1, № 1, 2) и сплавом Co-Mn (таблица 1, № 3).

Толщина покрытия δ определяется в основном методом получения покрытия. Самый широкий диапазон δ отмечен для покрытий, полученных методом ВПТ.

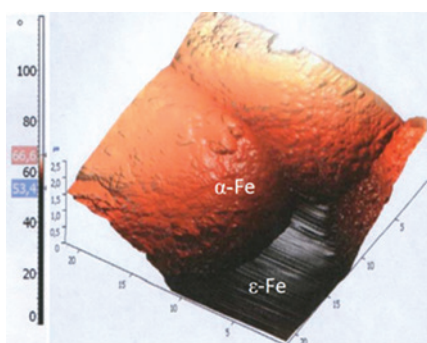


Рис. 1. Наноструктурное строение сплава Fe-Ni (фаза ϵ -Fe; метод ВПТ)

Fig. 1. Nanostructural structure of Fe-Ni alloy (ϵ -Fe phase; high-frequency alternating current method)

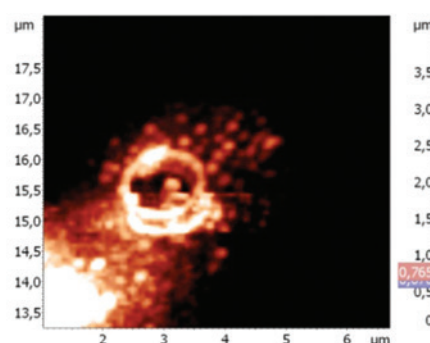


Рис. 2. Наноструктура сплава Co-Mn.

Светлые кольца Co(OH)_2
Fig. 2. Co-Mn alloy nanostructure.
Light rings of Co(OH)_2

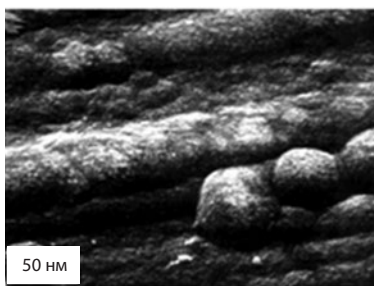


Рис. 3. Полислойные наноструктурные пленки сплава Ni-Cr. Поперечный срез для структуры [110]
Fig. 3. Poly-layer nanostructured Ni-Cr alloy membrane. Cross section for the structure [110]

Результаты

Из анализа экспериментальных данных следует, что наноструктура сплавов Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr формировалась по разным механизмам.

1. Особенностью механизма образования электролитического сплава Fe-Ni является образование новой ГПУ-фазы ϵ -Fe вследствие фазового перехода из α -Fe. Ранее эта экзотическая фаза была обнаружена во внутреннем ядре Земли, железных метеоритах и была получена в лабораторных условиях при $p = 11-11.5$ ГПа, $T = 750$ К; но при снятии давления происходит обратный фазовый переход ϵ -Fe $\rightarrow$ α -Fe [9]. То есть ни один лабораторный метод получения не позволяет со-

хранить фазу ϵ -Fe при нормальных условиях, за исключением вышеописанного метода ВПТ. Расчеты, проведенные по теории ориентированной электрокристаллизации (ТОЭ) для работы двумерного зародышеобразования, показали, что фаза ϵ -Fe в самопроизвольных процессах существовать не может, так как $A\epsilon$ -Fe $\gg$ $A\alpha$ -Fe, но возможно существование текстурного соответствия:

$$\frac{\alpha\text{-Fe(ОЦК)}}{(110)}, \frac{\epsilon\text{-Fe(ГПУ)}}{(0001)} [10].$$

В случае метода ВПТ фазовый переход происходит по ориентационному механизму. Анодная составляющая способствует удалению чужеродных частиц и части крайних атомов Fe. При катодной составляющей происходит переориентировка валентных связей и углов: α -Fe $\rightarrow$ ϵ -Fe. Размерные эффекты обеспечиваются управлением длительности импульса в заданных пределах. В результате сплав Fe-Ni содержит 2 фазы: α -Fe (ОЦК) и ϵ -Fe (ГПУ). Атомно-силовая микроскопия показала, что поликристаллы (рис. 1) состоят из нанопластин размером 10 нм, находящихся на расстоянии 8 нм. Это позволяет прогнозировать для сплава Fe-Ni повышение функциональных свойств (таблица 2).

Таблица 2
Table 2

Механизм формирования наноструктуры и свойства покрытий Mechanism of nanostructure formation and properties of coatings

Сплав	Механизм	Свойства	Области применения
Fe ₈₄ -Ni ₁₆	ВПТ, фазовый переход α -Fe $\rightarrow$ ϵ -Fe	HV = 1 780 МПа, $T_{xp} = -150$ °C, $K_n = 0.6$ мкм/год, $d = 8-10$ нм	Покрyтия для защиты нефтегазодобывающего оборудования, работающего в условиях Арктики. Коррозионностойкие защитные покрyтия в нефтехимии. Нанокатализатор для синтеза Фишера – Тропша
Co ₉₇ -Mn ₃	ВПТ, добавка о-АСК, α -Co $\gg$ α -Mn Co(OH) ₂	$H_c = 1050$ А/м, $d = 15-20$ нм, HV = 555 МПа,	Модуляционные системы. Нанокатализатор для синтеза Фишера – Тропша
Ni ₇₅ -Cr ₂₅	карбамид, α -Cr, NiO, АМФ	HV = 985 МПа, $d = 50-80$ нм	Коррозионностойкие защитные покрyтия в нефтехимии
Ni ₃₂ -Cr ₆₈	Н-кислота α -Cr, β -Ni, CrO ₃	HV = 690 МПа, $d = 80-100$ нм	Тензорезистивные элементы

2. Лучшее покрытие сплавом Co-Mn получено методом ВПТ. Новых фаз не образуется, но появляется возможность управления процентным содержанием фазы α -Co при помощи ПАВ – о-АСК. Роль последней – поддержание pH прикатодного слоя на требуемом уровне для связывания H_2 . Механизмы формирования наноструктуры в этом случае сводятся к обеспечению размерных эффектов – пленки аморфной фазы $Co(OH)_2$ вокруг кластеров сплава Co-Mn (рис. 2). При наличии тонких пленок сплав Co-Mn должен обладать отличными магнитными и каталитическими свойствами.

3. Покрытия Ni-Cr с высокими механическими свойствами можно спрогнозировать с помощью ТОЭ [10]. Величина микротвердости четко коррелирует с энергетической характеристикой – эффективной поверхностной энергией $\bar{\sigma}_{hkl}$, чем она больше, тем выше микротвердость [11]. Рассчитав оптимальные значения поверхностной энергии для сплава Ni-Cr, мы получили покрытие с высокой микротвердостью. То есть микротвердостью можно управлять, получая покрытие с высокими значениями эффективной поверхностной энергии при активирующей адсорбции и наличием наноструктурных пленок.

Выводы

1. Предложены и обоснованы механизмы формирования наноструктуры гальванических покрытий на основе металлов подгруппы железа:

- в результате фазового перехода и образования новой ГПУ-фазы (Fe-Ni, ВПТ);
- за счет регулируемого содержания аморфной фазы $Co(OH)_2$ и прогнозируемого фазового и химического состава (Co-Mn, ТОЭ);
- за счет прогнозирования и расчета заданной $\bar{\sigma}_{hkl}$ по ТОЭ и полученных аморфных пленок $Cr(OH)_3 \cdot (H_2O) \cdot 2H_2O$ (Ni-Cr).

Химические составы сплавов $Ni_{75}-Cr_{25}$ и $Ni_{32}-Cr_{68}$ получены из электролита одинакового состава, но с разными добавками: карбамид и Н-кислота соответственно.

2. Показано, что наиболее эффективным способом обеспечения наличия наноструктуры является метод ВПТ. Размерные эффекты наблюдались только при этом методе. Разнообразие физико-механических свойств позволяет рекомендовать применение покрытий в различных областях промышленности.

В ходе проведенного исследования методом высокочастотного переменного тока получены наноструктурные покрытия сплавами Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr.

Данные наноструктурные электролитические покрытия удовлетворяют требованиям к криогенным антикоррозионным покрытиям и способны по технологичности и экономичности заменить применяемый в настоящее время в машиностроении большой кластер разнообразных по своим физико-химическим свойствам материалов.

Библиографический список

1. Sergeev, G. B. Nanochemistry of metals / G. B. Sergeev. – DOI 10.1070/RC2001v070n10ABEH000671. – Текст : непосредственный // Russian Chemical Reviews. – 2001. – Vol. 70, No 10. – P. 809–825.
2. Gusev, A. I. Nanocrystalline materials / A. I. Gusev, A. A. Rempel. – Chippenham : Cambridge International Science Publishing, 2004. – 351 p. – Текст : непосредственный.
3. Crystalline and amorphous electroless Co-W-P coatings / S. Armyanov, E. Valova, A. Franquet [et al.]. – DOI 10.1149/1.1990124 // Journal of the Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152, № 9. – P. 612–619.
4. Electroless deposition of Ni-Sn-P and Ni-Sn-Cu-P coatings / J. Georgieva, S. Kawashima, S. Armyanov [et al.]. – DOI 10.1149/1.2050467. – Текст : непосредственный // Journal of The Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152, No 11. – P. 783.
5. Воздвиженский, В. М. Классификация легирующих элементов и расчет количества γ' -фазы в жаропрочных никелевых сплавах / В. М. Воздвиженский, А. А. Шатульский, М. А. Шаповалова. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 8. – С. 44–49.

6. Korotaev, A. D. Structural-phase state, elastic stress, and functional properties of nanocomposite coatings based on amorphous carbon / A. D. Korotaev, I. Y. Litovchenko, S. V. Ovchinnikov. – DOI 10.1134/S1029959919060055. – Текст : непосредственный // *Physical Mesomechanics*. – 2019. – Vol. 22, No 6. – P. 488–495.
7. Inhibition and nickel electrocrystallization / J. Amblard, I. Epelboin, M. Froment, G. Maurin. – DOI 10.1007/BF00616093. – Текст : непосредственный // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 1979. – No 9. – С. 233–242.
8. Breakthroughs in optimization of mechanical properties of nanostructured metals and alloys / C. C. Koch, K. M. Youssef, R. O. Scattergood, K. L. Murty. – DOI 10.1002/adem.200500094. – Текст : непосредственный // *Advanced Engineering Materials*. – 2005. – Vol. 7, No 9. – P. 787–794.
9. Zhikhareva, I. G. The role of nanostructure forming mechanism in the production of universal functional coatings with Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys / I. G. Zhikhareva, V. V. Schmidt, D. V. Denisenko. – DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032002. – Текст : непосредственный // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, September, 07–11. – Sevastopol, 2020. – P. 032002.
10. Schmidt, V. V. Hardening of coatings with Ni-Co-Cr alloy dye to nanostructure / V. V. Schmidt, D. V. Denisenko, I. G. Zhikhareva. – DOI 10.1088/1742-6596/1431/1/012018 // *Journal of Physics: Conference Series: VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"*, November, 19–22. – Vol. 1431. – Moscow : Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012018.
11. Zhikhareva, I. G. Development of corrosion-protective coatings with a Fe-Ni nanostructured alloy, designed to work in the Arctic / I. G. Zhikhareva, D. V. Denisenko, V. V. Schmidt. – DOI 10.1063/1.5135163. – Текст : непосредственный // *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*, December, 09–13. – Vol. 2176. – Ekaterinburg : American Institute of Physics, 2019. – P. 040014.

References

1. Sergeev, G. B. (2001). Nanochemistry of metals. *Russian Chemical Reviews*, 70 (10), pp. 809-825. (In English). DOI 10.1070/RC2001v070n10ABEH000671.
2. Gusev, A. I., & Rempel, A. A. (2004). *Nanocrystalline materials*. Chippenham, Publ. Cambridge International Science Publishing, 351 p. (In English).
3. Armyanov, S., Valova, E., Franquet, A., Dille, J., Delplancke, J.-L., Hubin, A., ... Vassilev, Ts. (2005). Crystalline and amorphous electroless Co-W-P coatings. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(9), pp. 612-619. (In English). DOI 10.1149/1.1990124.
4. Georgieva, J., Kawashima, S., Armyanov, S., Valova, E., Hubin, A., Koyama, Y., ... Tsacheva, Ts. (2005). Electroless deposition of Ni-Sn-P and Ni-Sn-Cu-P coatings. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(11), pp. 783. (In English). DOI 10.1149/1.2050467.
5. Vozdvizhensky, V. M., Shatulsky, A. A., & Shapovalova, M. A. (2007). Classification of alloying elements and γ' -phase quantity calculation in heat-resistant nickel alloys. *Blanking production in mechanical engineering*, (8), pp. 44-49. (In Russian).
6. Korotaev, A. D., Litovchenko, I. Y., & Ovchinnikov, S. V. (2019). Structural-phase state, elastic stress, and functional properties of nanocomposite coatings based on amorphous carbon. *Physical Mesomechanics*, 22(6), pp. 488-495. (In English). DOI 10.1134/S1029959919060055.
7. Amblard, J., Epelboin, I., Froment, M., & Maurin, G. (1979). Inhibition and nickel electrocrystallization. *Journal of Applied Electrochemistry*, (9), pp. 233-242. (In English). DOI 10.1007/BF00616093.
8. Koch, C. C., Youssef, K. M., Scattergood, R. O., & Murty, K. L. (2005). Breakthroughs in optimization of mechanical properties of nanostructured metals and alloys. *Advanced Engineering Materials*, 7(9), pp. 787-794. (In English). DOI 10.1002/adem.200500094.

9. Zhikhareva, I. G., Schmidt, V. V., & Denisenko, D. V. (2020). The role of nanostructure forming mechanism in the production of universal functional coatings with Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, September, 07–11. Sevastopol, Publ. IOP Publishing Ltd, pp. 032002. (In English). DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032002.
10. Schmidt, V. V., Denisenko, D. V., & Zhikhareva, I. G. (2020). Hardening of coatings with Ni-Co-Cr alloy dye to nanostructure. Journal of Physics: Conference Series : VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials", November, 19-22. Moscow, Publ. Institute of Physics Publishing, 1431, pp. 012018. (In English). DOI 10.1088/1742-6596/1431/1/012018.
11. Zhikhareva, I. G., Denisenko, D. V., & Schmidt V. V. (2019). Development of corrosion-protective coatings with a Fe-Ni nanostructured alloy, designed to work in the Arctic. AIP Conference Proceedings : Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, December, 09–13, 2176. Ekaterinburg, Publ. American Institute of Physics, pp. 040014. (In English). DOI 10.1063/1.5135163.

Сведения об авторах

Жихарева Ирина Георгиевна, д-р хим. наук, профессор кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zhiharevaig@tyuiu.ru

Шмидт Вадим Владимирович, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, преподаватель кафедры войскового строительства, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, e-mail: shmidt_vadim@mail.ru

Денисенко Денис Владимирович, ассистент-стажер кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, ведущий инженер, ПАО «Тюменский проектный и научно-исследовательский институт нефтяной и газовой промышленности имени В. И. Муравленко», e-mail: ardiasardias@gmail.com

Щипанов Владимир Павлович, д-р хим. наук, профессор кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: schipanovvp@tyuiu.ru

Федоров Александр Дмитриевич, обучающийся кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет

Неустроев Антон Иванович, обучающийся кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет

Information about the authors

Irina G. Zhikhareva, Doctor in Chemistry, Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: zhiharevaig@tyuiu.ru

Vadim V. Schmidt, Candidate in Chemistry, Associate Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, Lecturer at the Department of Military Construction, Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A. I. Proshlyakov, e-mail: shmidt_vadim@mail.ru

Denis V. Denisenko, Intern-Assistant at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, Leading Engineer, PJSC "Tyumen Design and Research Institute of Oil and Gas Industry named after V. I. Muravlenko", e-mail: ardiasardias@gmail.com

Vladimir P. Shchipanov, Doctor in Chemistry, Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: schipanovvp@tyuiu.ru

Alexander D. Fedorov, Student at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, e-mail: af524523@gmail.com

Anton I. Neustroev, Student at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, e-mail: anton_neustroev2020@mail.ru

Получена 12 мая 2023 г., одобрена 26 мая 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.

Received 12 May 2023, Approved 26 May 2023, Accepted for publication 28 September 2023