УДК 621.892.9 *Оригинальная статья*

Влияние условий получения блестящих никелевых покрытий, модифицированных наноалмазами на их морфологические особенности

Е.Г. Корж[1], К.М. Лопатин[2], П.Е. Антипов[1], В.Э. Бурлакова[1]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
[2]ООО «Эталон»
346886, Россия, г. Батайск. ул. Промышленная, 6
ekorzh@donstu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.679

Аннотация: В работе электрохимическим методом в электролите блестящего никелировании при катодной плотности тока 1, 3 и 5 А/дм^2 получены блестящие никелевые покрытия модифицированные наноалмазами. Полученные блестящие никелевые покрытия с наноалмазами исследованы методом атомно-силовой микроскопии. В результате установлено, что топография поверхности блестящих никелевых покрытий с наноалмазами имеет значительные отличия и зависит от условий (катодной плотности тока) получения покрытий. Блестящие никелевые покрытия с наноалмазами исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что морфологические особенности никелевых покрытий с наноалмазами, полученных при катодной плотности тока 1 А/дм^2, характеризуются повышенным содержанием пор и неровностей в сравнении с блестящими никелевыми покрытиями, полученными при катодной плотности тока 3 и 5 А/дм^2. Обнаружено присутствие на поверхности блестящих никелевых покрытий, полученных при плотности тока 3 и 5 А/дм^2 включений виде округлых выступов. С помощью спектров энергодисперсионной спектроскопии доказано присутствие фазы углерода в составе композитного блестящего никелевого покрытия, что указывает на наличие наноалмазов в его структуре. Установлено, что в блестящем никелевом покрытии с наноалмазами, полученном при катодной плотности тока 5 А/дм^2, содержится до 10,6% фазы углерода.
Ключевые слова: наноалмазы, блестящее никелевое покрытие, композиционное покрытие, морфология поверхности.

Корж Екатерина Геннадьевна – к.т.н., доцент кафедры «Химия», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
Лопатин Кирилл Михайлович – учредитель, ООО «Эталон»
Антипов Павел Евгеньевич – инженер лаборатории механики и биосовместимых материалов, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
Бурлакова Виктория Эдуардовна – д.т.н., профессор кафедры «Химия», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Original paper

The influence of conditions for obtaining shiny nickel coatings modified with nanodiamonds on their morphological features

E.G. Korzh[1], K.M. Lopatin[2], P.E. Antipov[1], V.E. Burlakova[1]
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
[2]«Etalon» LLC, Bataysk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.679

Abstract: In this study, bright nickel coatings modified with nanodiamonds were obtained using the electrochemical method in a bright nickel plating electrolyte at cathodic current densities of 1, 3, and

© Е.Г. Корж, К.М. Лопатин, П.Е. Антипов, В.Э. Бурлакова, 2026

5 A/dm^2. The resulting bright nickel coatings with nanodiamonds were studied using atomic force microscopy. It was found that the surface topography of the bright nickel coatings with nanodiamonds varies significantly and depends on the conditions (cathode current density) of coating production. The bright nickel coatings with nanodiamonds were studied using scanning electron microscopy. It was found that the morphological features of the nickel coatings with nanodiamonds obtained at a cathodic current density of 1 A/dm^2 are characterized by an increased content of pores and irregularities compared to bright nickel coatings obtained at current densities of 3 and 5 A/dm^2. The presence of inclusions in the form of rounded protrusions on the surface of shiny nickel coatings obtained at current densities of 3 and 5 A/dm^2 was detected. Using energy-dispersive X-ray spectra, the presence of a carbon phase in the composite shiny nickel coating was confirmed, indicating the presence of nanodiamonds in its structure. It was found that the shiny nickel coating with nanodiamonds obtained at a cathodic current density of 5 A/dm^2 contains up to 10,6% of the carbon phase.
Keywords: nanodiamonds, shiny nickel coating, composite coating, surface morphology.

Ekaterina G. Korzh – PhD, Associate Professor, Department of Chemistry, Don State Technical University, ORCID: 0000-0002-4002-2082
Kirill M. Lopatin – Founder, Etalon LLC
Pavel E. Antipov – Engineer, Laboratory of Mechanics and Biocompatible Materials, Don State Technical University, ORCID: 0009-0009-8752-8572
Victoria E. Burlakova – Dr. Sc, Professor, Department of Chemistry, Don State Technical University, ORCID: 0000-0003-3779-7079

Поступила в редакцию/received: 26.06.2026; после рецензирования/revised: 22.07.2026; принята/accepted: 25.07.2026.

1. Введение

Получение композитных никелевых покрытий методом электролитического осаждения является одним из основных в гальванической промышленности. Присутствие в композитных никелевых покрытиях неметаллических включений, таких как оксиды [1, 2], нитриды [3, 4], карбиды [5-7] придает им желаемую микроструктуру и свойства. Среди неметаллических включений перспективными являются углеродные наночастицы (наноалмазы) благодаря их высокой твердости, химической инертности, коррозионной стойкости и износостойкости [8-11]. Большое внимание уделяется исследованиям композитных никелевых покрытий с наноалмазами, а именно изучению их свойств и влиянию параметров получения на данные свойства. Ранее было установлено, что увеличение концентрации наноалмазов в покрытиях повышает их износостойкость и коррозионную стойкость [12], а увеличение катодной плотности тока при получении покрытия может привести к увеличению, а затем к уменьшению содержания наноалмазов в них [13].

Однако, несмотря на большой количество исследований, связанных с получением покрытий и их свойствами, изучение осаждения наноалмазов в никелевых покрытиях и влияние на их микроструктуру и морфологию остается актуальным. Проведение таких комплексных исследований поможет оптимизировать процесс электроосаждения и расширить области применения никелевых покрытий с наноалмазами. В связи с этим целью работы является изучение влияния условий получения никелевых

покрытий с наноалмазами на их микроструктуру и морфологию поверхности.

2. Объекты исследования и методология

В работе исследованы никелевые покрытия, модифицированы наноалмазами, полученные электрохимическим методом в электролите блестящего никелировании. Состав электролита: никель сернокислый 300 г/л, борная кислота 40 г/л, хлорид никеля 50 г/л, блескообразующие модификаторы. Также в качестве добавки использовали наноалмазы, полученные методом гидродинамической кавитации под высоким давлением [14] с концентраций 5%. Размер наноалмазов составляет от 1 до 3 нм [15]. Электролиз проводили в гальваностатическом режиме в гальванической ванне. В качестве катода использовали стальные пластины площадью 0,05 дм^2, площадь никелевого анода – 0,05 дм^2. Катод перед проведением испытаний очищали от загрязнений, обезжиривали и проводили активацию поверхности путем кратковременного погружения в раствор соляной кислоте (1:1), тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе. Для перемешивания электролита в процессе электролиза использовали сжатый воздух (барботаж). Время электролиза составляло 15 минут. Катодная плотность тока (i_k) 1, 3 и 5 А/дм^2.

Изучение топографии поверхности блестящего никелевого покрытия, модифицированного наноалмазами, проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием зондового микроскопа Phywe Compact. При сканировании применялся полуконтактный режим с использованием монокристаллического кремниевого зонда с алюминиевым покрытием. Сканирование проводилось со скоростью 0,3 мс/линия. Полученные данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения Gwyddion.

Морфологические особенности и элементный состав композиционных блестящих никелевых покрытий, модифицированных наноалмазами изучались с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3 LMU, оснащённом системой энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDS) – AZTECH Advanced Inca Energy 350 с безазотным детектором X-MAX 80. В основе детектора используется кремний-дрейфовый элемент (SDD) с активной площадью 80 мм², обеспечивающий высокое разрешение: 127 эВ по линии $MnK\alpha$. Съёмка проводилась в режиме вертикального сканирования (DEPTH-режим), при высоком вакууме. Для качественного и количественного элементного анализа использовалось программное обеспечение AZtec 2.1.

3. Результаты и обсуждение

Для определения морфологических особенностей полученных блестящих никелевых покрытий с наноалмазами использовался метод АСМ. Как следует из результатов (см. рис. 1 а – 1 е), морфология покрытий значительно отличается в зависимости от условий (плотности тока) их получения.

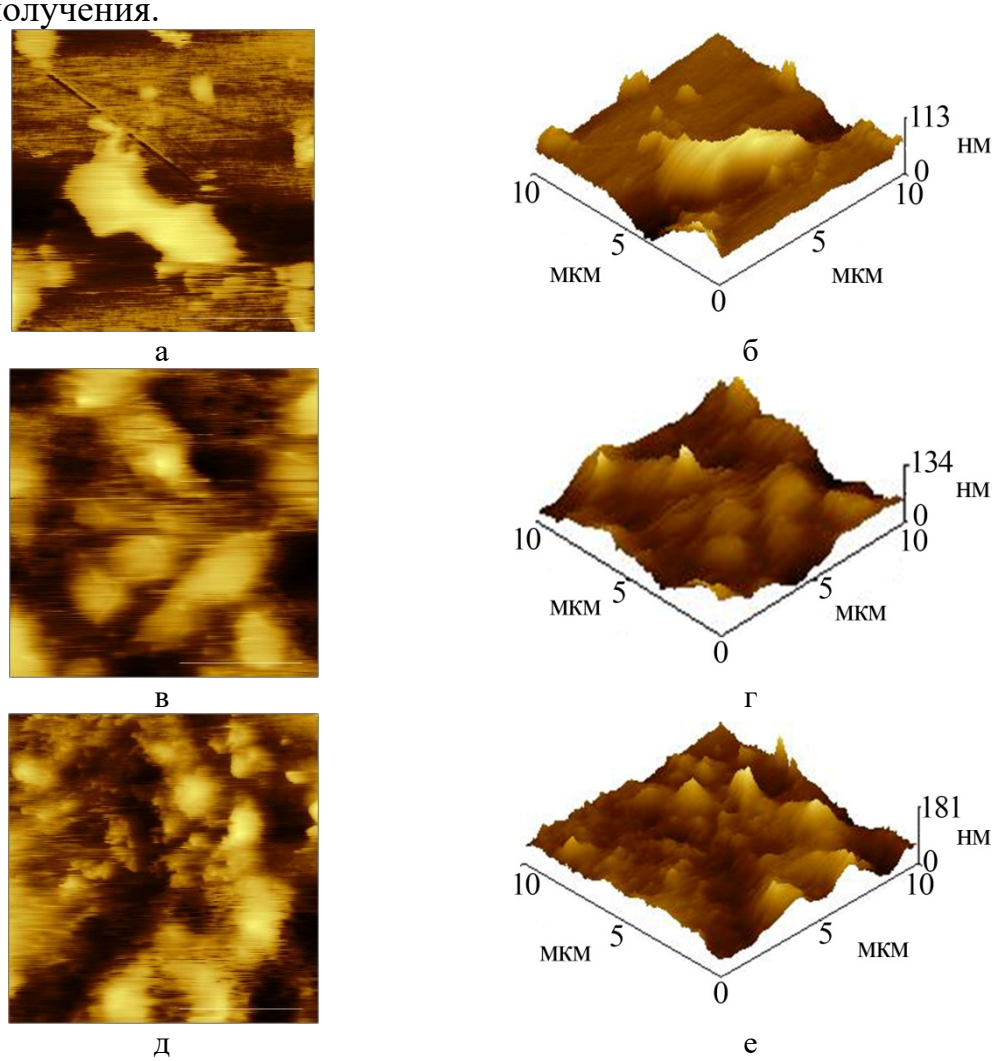
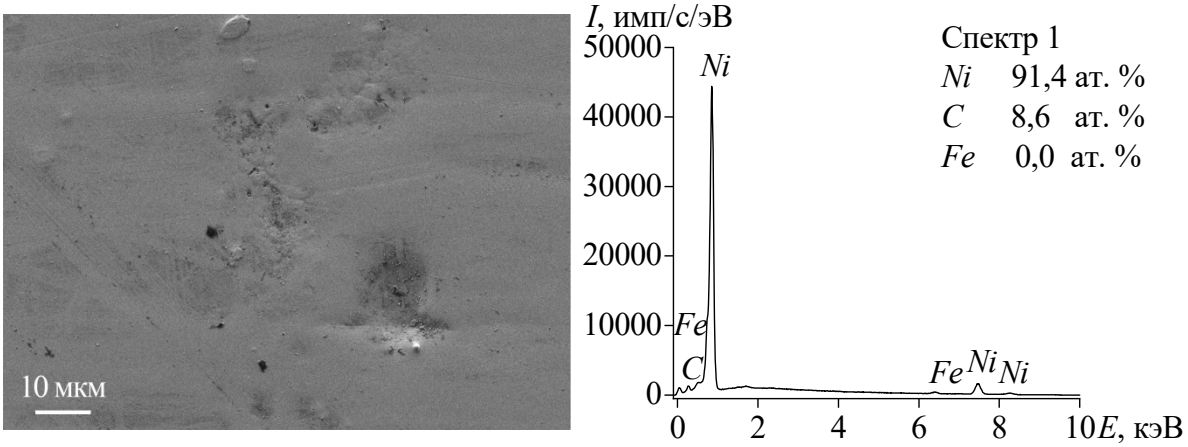


Рис. 1. Результаты АСМ (2D- и 3D-визуализация) блестящих никелевых покрытий с наноалмазами полученых в электролите никелирования при i_k: а, б – 1 А/дм^2, в, г – 3 А/дм^2, д, е – 5 А/дм^2.

Так поверхность блестящего никелевого покрытия с наноалмазами, полученного при i_k – 1 А/дм^2, имеет ярко выраженные возвышенности с максимумом по ось Z до 113 нм и размером в латеральной плоскости более 1 мкм (см. рис. 1 а, 1 б). Средняя шероховатость R_a такого покрытия составляет 14,1 нм. Поверхность никелевого покрытия, полученного при i_k – 3 А/дм^2, характеризуется присутствием возвышенностей с перепадом высот до 134 нм, однако их размер в латеральной плоскости значительно меньше и не превышает 500 нм (см. рис. 1 в, 1 г). Средняя шероховатость

R_a равна 15,8 нм. Никелевые покрытия полученных при i_k – 5 А/дм^2, отличаются неровностями размером до 200 нм и перепадом высот до 181 нм (см. рис. 1 д, 1 е). Средняя шероховатость R_a равна 17,7 нм.

Для сравнения морфологии поверхности блестящих никелевых покрытий с наноалмазами проводили исследование методом СЭМ, которое указывает на значительные отличия в однородности поверхности покрытия в зависимости от условий его получения. Анализ результатов СЭМ блестящего никелевого покрытия с наноалмазами, полученного при i_k – 1 А/дм^2 демонстрирует наличие выраженных неровностей в виде небольших углублений и пор, а также присутствием микроструктурных возвышенностей (см. рис. 2 а), что может быть результатом неравномерного осаждения ионов никеля на стальную поверхность.



а б

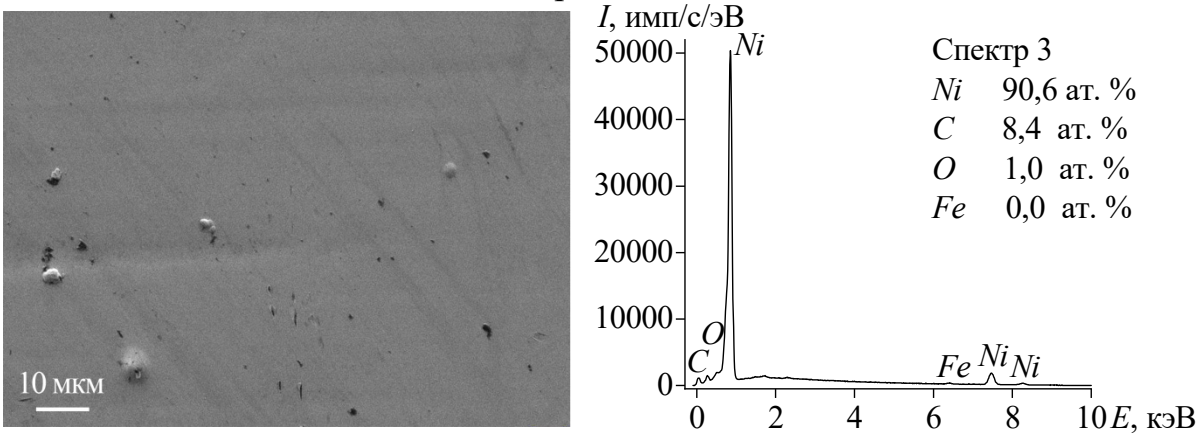
Рис. 2. Результаты СЭМ блестящего никелевого покрытия с наноалмазами, полученного при i_k – 1 А/дм^2: а – потография поверхности, б – энергодисперсионный спектр.

Энергодисперсионный анализ указывает на присутствие фазы никеля в покрытии до 91,4% и содержание фазы углерода до 8,6% (см. рис. 2 б). Присутствие фазы железа не обнаружено, что указывает на отсутствие взаимодействия электронного пучка с поверхность стали при проведении анализа.

Анализ результатов СЭМ блестящего никелевого покрытия, полученного при i_k – 3 А/дм^2 указывает на высокую микроструктурную однородность поверхности покрытия (см. рис. 3 а), и полное отсутствие видимых больших пор и углублений. Также на поверхности присутствуют единичные выступы размером около 1 мкм, что может быть результатом конгломерации ионов никеля и наноалмазов с образованием морфологических особенностей на поверхности покрытия.

EDS спектры покрытия показывают на содержания фазы углерода в пробе до 8,53% (см. рис. 3 б), что также доказывает присутствие

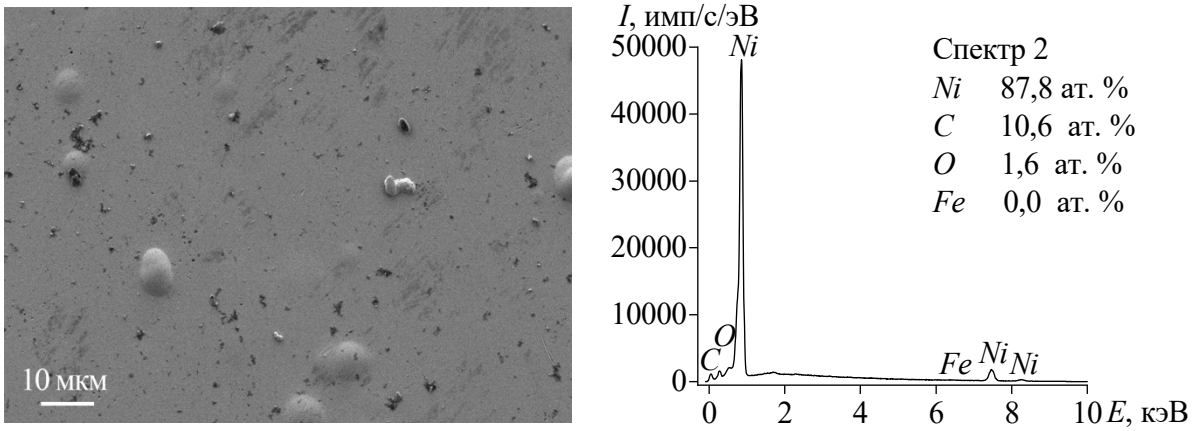
неметаллических включений в покрытия в виде наноалмазов.



а б

Рис. 3. Результаты СЭМ блестящего никелевого покрытия с наноалмазами, полученного при i_k – 3 А/дм^2: а – потография поверхности, б – энергодисперсионный спектр.

Морфологическая картина никелевого покрытия, полученного при i_k – 5 А/дм^2 также изменяется и характеризуется увеличением количества включений на поверхности, выраженных виде округлых возвышенностей (см. рис. 4 а).



а б

Рис. 4. Результаты СЭМ блестящего никелевого покрытия с наноалмазами, полученного при i_k – 5 А/дм^2: а – потография поверхности, б – энергодисперсионный спектр.

При этом EDS спектры покрытия указывают на повышение до 10,6% содержания фазы углерода в пробе (см. рис. 4 б), при одновременном отсутствии фазы железа.

4. Заключение

В работе при различной катодной плотности тока получены гальванические блестящие никелевые покрытия модифицированные наноалмазами. Установлено, что изменение катодной плотности тока при получении никелевых покрытий с наноалмазами в электролите блестящего

никелирования влияет на морфологию и микроструктуру их поверхности. Выявлено, что при получении покрытий с катодной плотностью тока 3 и 5 А/дм^2 на поверхности покрытия отсутствуют поры и впадины. Установлено, что наибольшее процентное содержание до 10,6% фазы углерода, указывающей на присутствие наноалмазов в покрытии, наблюдается в блестящем никелевом покрытии, полученном при катодной плотности тока 5 А/дм^2.

Библиографический список:

1. **Zhang, W.** Effects of cerium oxide doping on microstructure and properties of Ni-GO-CeO_2 nanocomposite coatings / W. Zhang, B. Li, M. Hong, M. Li // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – V. 21. – P. 3440-3450. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.149.
2. **Köse, M.** Graphene oxide reinforced NiPCo composite coatings: Optimum graphene oxide content for improved anticorrosion and wear resistance / M. Köse, S. Tan, M. Uysal // Surface and Coatings Technology. – 2025. – V. 504. – Art. № 132021. – 21 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2025.132021.
3. **Fatima, I.** Enhanced electrochemical and mechanical performance of BN reinforced Ni-P based nanocomposite coatings / I. Fatima, O. Fayyaz, M.M. Yusuf et al. // Diamond and Related Materials. – 2022. – V. 130. – Art. № 109454. – 14 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109454.
4. **Song, R.** Silicon nitride nanoparticles reinforced the corrosion resistance of Ni-Cu composite coating in simulated seawater solution / R. Song, S. Zhang, Y. He et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2022. – V. 649. – Art. № 129427. – 10 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129427.
5. **Li, Z.** Effect of titanium carbide addition on the microstructure and properties of nickel-based alloy coatings / Z. Li, T. Lin, C. Jing et al. // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2025. – V. 56. – I. 6. – P. 844-859. DOI: 10.1002/mawe.1744.
6. **Bayatlı, A.** Effect of boron carbide reinforcement on surface properties of electroless Ni–B and Ni–B–W coatings / A. Bayatlı, E.F. Şahin, M. Kocabaş // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – V. 305. – Art. № 127899. – 11 p. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.127899.
7. **Górka, J.** The microstructure and properties of laser-cladded Ni-based self-fluxing alloy coatings reinforced by TiC particles / J. Górka, A. Lont, T. Poloczek // Coatings. – 2025. – V. 15. – I. 5. – Art. № 527. – 16 p. DOI: 10.3390/coatings15050527.
8. **Maurya, S.S.** High temperature wear behavior of nanodiamond reinforced nickel-aluminum composite coatings / S.S. Maurya, A.K. Grain, R. Kumar et al. // Wear. – 2024. – V. 542-543. – Art. № 205280. – 16 p. DOI: 10.1016/j.wear.2024.205280.
9. **Wintachai, P.** Tribological properties of diamond-reinforced electrodeposited NiP coatings: Mono-vs. bimodal particle incorporations / P. Wintachai, N. Kothanam, K. Harahai et al. // Diamond and Related Materials. – 2025. – Art. № 113169. – 16 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2025.113169.
10. **Maurya, S.S.** Microstructural, mechanical and tribological behavior of nanodiamonds reinforced plasma sprayed nickel-aluminum coating / S.S. Maurya, K.K. Pandey, S. Sharma et al. // Diamond and Related Materials. – 2023. – V. 133. – Art. № 109714. – 26 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.109714.
11. **Mirche, K.K.** Microstructure and corrosion behavior of plasma-sprayed nanodiamond-reinforced NiAl nanocomposite coating / K.K. Mirche, K.K. Pandey, S.M. Pandey, A.K. Keshri // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – V. 32. – I. 5. – P. 1299-1310. DOI: 10.1007/s11666-023-01558-6.
12. **Hong, Q.** A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification / Q. Hong, R. Zhou, X. Guo et al. // Diamond and Related Materials. – 2023. – V. 137. – Art. № 109714. – 10 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110093.
13. **Zhang, W.** Effect of current density and agitation modes on the structural and corrosion behavior of Ni/diamond composite coatings / W. Zhang, T. Mei, B. Li et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – V. 12. – P. 1473-1485. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.084.
14. **Пат. 2838772 МПК C01B 32/166 B82Y B01J 13/00 B82B 3/00 B01J 19/10 B01J 19/12.** Способ получения водной дисперсии наночастиц углерода / Курлович С. А., Ковтун М. В.; заявитель и патентообладатель Курлович С. А., Ковтун М. В. – № 2024114243; заявл. 24.05.24; опубл. 22.04.2025, Бюл. № 12. – 9 с.
15. **Beskopylny, A.N.** Performance and mechanism of the structure formation and physical-mechanical properties of concrete by modification with nanodiamonds / A.N. Beskopylny, S.A. Stel'makh, E.M. Shcherban

et al. // Construction and Building Materials. – 2024. – V. 452. – Art. № 138994. – 15 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138994.

References:

1. Zhang W., Li B., Hong M., Li M. Effects of cerium oxide doping on microstructure and properties of Ni-GO-CeO_2 nanocomposite coatings, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 3440-3450. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.149.
2. Köse M., Tan S., Uysal M. Graphene oxide reinforced NiPCo composite coatings: Optimum graphene oxide content for improved anticorrosion and wear resistance, *Surface and Coatings Technology*, 2025, vol. 504, art. no. 132021, 21 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2025.132021.
3. Fatima I., Fayyaz O., Yusuf M.M. et al. Enhanced electrochemical and mechanical performance of BN reinforced Ni-P based nanocomposite coatings, *Diamond and Related Materials*, 2022, vol. 130, art. no. 109454, 14 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109454.
4. Song R., Zhang S., He Y. et al. Silicon nitride nanoparticles reinforced the corrosion resistance of Ni-Cu composite coating in simulated seawater solution, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, vol. 649, art. no 129427, 10 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129427.
5. Li Z., Lin T., Jing C. et al. Effect of titanium carbide addition on the microstructure and properties of nickel-based alloy coatings, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2025, vol. 56, issue 6, pp. 844-859. DOI: 10.1002/mawe.1744
6. Bayatlı A., Şahin E.F., Kocabaş M. Effect of boron carbide reinforcement on surface properties of electroless Ni–B and Ni–B–W coatings, *Materials Chemistry and Physics*, 2023, vol. 305, art. no. 127899, 11 p. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.127899.
7. Górka J., Lont A., Poloczek T. The microstructure and properties of laser-cladded Ni-based self-fluxing alloy coatings reinforced by TiC particles, *Coatings*, 2025, vol. 15, issue 5, art. no. 527, 16 p. DOI: 10.3390/coatings15050527.
8. Maurya S.S., Grain A.K., Kumar R. et al. High temperature wear behavior of nanodiamond reinforced nickel-aluminum composite coatings, *Wear*, 2024, vol. 542-543, art. no. 205280, 16 p. DOI: 10.1016/j.wear.2024.205280.
9. Wintachai P., Kothanam N., Harahai K. et al. Tribological properties of diamond-reinforced electrodeposited NiP coatings: Mono-vs. bimodal particle incorporations, *Diamond and Related Materials*, 2025, art. no. 113169, 16 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2025.113169.
10. Maurya S.S., Pandey K.K., Sharma S. et al. Microstructural, mechanical and tribological behavior of nanodiamonds reinforced plasma sprayed nickel-aluminum coating, *Diamond and Related Materials*, 2023, vol. 133, art. no. 109714, 26 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.109714.
11. Mirche K.K., Pandey K.K., Pandey S.M. & Keshri A.K. Microstructure and corrosion behavior of plasma-sprayed nanodiamond-reinforced NiAl nanocomposite coating, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2023, vol. 32, issue 5, pp. 1299-1310. DOI: 10.1007/s11666-023-01558-6.
12. Hong Q., Zhou R., Guo X. et al. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification, *Diamond and Related Materials*, 2023, vol. 137, art. no. 109714, 10 p. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110093.
13. Zhang W., Mei T., Li B. et al. Effect of current density and agitation modes on the structural and corrosion behavior of Ni/diamond composite coatings, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 12, pp. 1473-1485. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.084.
14. Kurlovich S.A., Kovtun M.V. *Sposob poluhenia vodnoi dispersii nanohastiz ugleroda* [Method for obtaining an aqueous dispersion of carbon nanoparticles]. Patent RF, no 2838772, 2025.
15. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban E.M. et al. Performance and mechanism of the structure formation and physical-mechanical properties of concrete by modification with nanodiamonds, *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 452, art. no. 138994, 15 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138994.