

## **Коррозионная стойкость композиционных цинк-наноалмазных покрытий**

Е.Г. Корж, В.Э. Бурлакова

*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»  
344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1  
ekorz@donstu.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.687

**Аннотация:** В работе методом гидродинамической кавитации получены наноалмазы ООО ТПК «Синтез». Синтезированные наноалмазы исследованы методом атомно-силовой микроскопии и в результате было установлено, что их частицы имеют форму близкую к сферической, а размер частиц по оси *Z* не превышает 10 нм, которые агломерируют и образуют более крупных структуры размером до 100 нм. Синтезированные наноалмазы в виде коллоидных растворов концентрацией 0,5%, 1%, 3%, 5% и 7% использовали в электролите цинкования для получения композиционных цинк-наноалмазных покрытий. Полученные покрытия исследовали методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии. Было доказано присутствие фазы углерода в составе композиционного цинкового покрытия, соответствующей алмазоподобной структуре. Установлено, что морфологические особенности поверхности цинк-наноалмазного покрытия значительно отличаются от морфологии поверхности цинкового покрытия, что выражено в отсутствии большого количества впадин и неровностей. Проведены испытания на коррозионную активность цинк-наноалмазных покрытий в 3% растворе хлорида натрия (*NaCl*). Определено, что композиционные цинк-наноалмазные покрытия обладают повышенной коррозионной стойкостью в сравнении с цинковыми покрытиями, при этом скорость коррозии уменьшается на 42%.

*Ключевые слова:* наноалмазы, цинковое покрытие, композиционное покрытие, цинк-наноалмазное покрытие, коррозия.

*Корж Екатерина Геннадьевна – к.т.н., доцент кафедры «Химия», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»*

*Бурлакова Виктория Эдуардовна – д.т.н., профессор кафедры «Химия», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»*

*Original paper*

### **Corrosion resistance of composite zinc-nanodiamond coatings**

E.G. Korzh, V.E. Burlakova

*Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.687

**Abstract:** In the work, nanodiamonds were obtained by the method of hydrodynamic cavitation by LLC ICC «Sintez». The synthesized nanodiamonds were studied using atomic force microscopy and it was found that their particles have a shape close to spherical, and the particle size along the *Z* axis does not exceed 10 nm. The particles agglomerate and form larger structures up to 100 nm in size. The synthesized nanodiamonds in the form of colloidal solutions with a concentration of 0,5%, 1%, 3%, 5% and 7% were used in a galvanizing electrolyte to obtain composite zinc-nanodiamond coatings. The resulting coatings were studied using X-ray phase analysis and scanning electron microscopy. The presence of a carbon phase in the composition of the composite zinc coating corresponding to a diamond-like structure was proven. It was found that the morphological features of the zinc-nanodiamond coating surface differ significantly from the morphology of the zinc coating surface, which is expressed in the absence of a large number of depressions and irregularities. The corrosion activity of zinc-nanodiamond coatings was tested in a 3% sodium chloride (*NaCl*) solution. It was determined that composite zinc-nanodiamond coatings have increased corrosion resistance compared to zinc coatings, while the corrosion rate is reduced by 42%.

*Keywords: nanodiamonds, zinc coating, composite coating, zinc-nanodiamond coating, corrosion.*

*Ekaterina G. Korzh – PhD, Associate Professor, Department of Chemistry, Don State Technical University, ORCID: 0000-0002-4002-2082*

*Victoria E. Burlakova – Dr. Sc, Professor, Department of Chemistry, Don State Technical University, ORCID: 0000-0003-3779-7079*

Поступила в редакцию/received: 02.07.2025; после рецензирования/reviced: 04.08.2025; принята/accepted: 05.08.2025

## **1. Введение**

Для достижения длительного срока службы покрытия в агрессивных средах необходимо повышение его прочности, что может дать значительные преимущества с точки зрения экономии затрат на обслуживание и ремонт, а также обеспечивать улучшенную защиту от износа и коррозии. Покрытия на основе цинка обширно используются в промышленности для снижения риска коррозии, однако, при воздействии промышленных загрязняющих веществ и кислотных или щелочных сред они становятся уязвимыми. Для повышения коррозионной стойкости цинковых покрытий в последние десятилетия разрабатывают композиционные покрытия, модифицированные наночастицами металлов [1-5] и различными аллотропными модификациями углерода [6-10], в том числе, наноалмазами (НА) [11-14]. При этом, исследования, связанные с изготовлением и коррозионным анализом цинковых композитных покрытий, очень ограничены в литературе. Хотя НА демонстрируют достаточно высокие показатели и характеристики, изучение покрытий с добавлением НА является пробелом в литературе и требует дополнительных исследований.

Целью настоящей работы является получение электрохимического цинкового покрытия, модифицированного НА, с повышенной коррозионной стойкостью.

## **2. Методика эксперимента**

В работе исследованы анодные покрытия, полученные электрохимическим методом в электролите цинкования переменного состава в зависимости от концентрации НА в его объеме. Растворитель - вода. В качестве добавки использовали НА, полученные методом гидродинамической кавитации под высоким давлением в интервале концентраций от 0,5 % до 7%. Синтез коллоидных растворов наноалмазов проводился ООО ТПК «Синтез» (<https://tpksintez.ru>) [15]. Электролитические анодные покрытия получали электролизом цинкового электролита (оксид цинка  $ZnO$  и гидроксид натрия  $NaOH$ ) с концентрацией НА в нем 0,5%, 1%, 3%, 5%, 7% коллоидного раствора. Электролиз проводили в гальваностатическом режиме в стеклянной ячейке полезным объемом 250 мл. В качестве катода использовали стальные пластины

площадью 0,05 дм<sup>2</sup>, площадь инертного анода – 0,05 дм<sup>2</sup>. Катод перед проведением испытаний протравливали в соляной кислоте (1:1), тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе. Время электролиза составляло 15 минут. Плотность тока 10 А/см<sup>2</sup>. Источником питания выступал прибор УИП-2, силу тока в цепи регистрировали миллиамперметром М-253.

Исследование размеров и формы НА, а также изучение топографии поверхности цинкового покрытия и цинк-наноалмазного покрытия, 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, имеющий резонансную частоту 190 кГц ± 60 кГц и жесткость 48 Н/м. Сканирование проводилось со скоростью 0,3 мс/линия при разрешении 512×512 точек, что обеспечивало детализированное представление о поверхности частиц. Полученные данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения Gwyddion.

Для определения фазового состава цинк-наноалмазных покрытий, полученных при электролизе в растворе электролита, модифицированного НА, проводили качественный рентгенофазовый анализ (РФА). Рентгенограммы снимались по методу порошка, после рассчитывались межплоскостные расстояния  $d$  и относительная интенсивность линий  $I$ . Сопоставление полученных значений с табличными данными (в пределах допустимой экспериментальной погрешности) позволяло надёжно идентифицировать присутствующие в образце фазы. Качественный РФА выполнялся на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA, с использованием медного излучения  $CuK\alpha$  (длина волны  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), в диапазоне углов  $2\theta$  от 5° до 70°, при скорости сканирования 5°/мин. Температура в ходе анализа поддерживалась на уровне 25°C.

Полученные рентгенограммы обрабатывались с применением порошковой базы данных PDF-2 [16].

Морфологические особенности и элементный состав композиционных цинк-наноалмазных покрытий 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 мм<sup>2</sup>, 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, с помощью которого осуществлялась обработка спектров и расчёт концентраций элементов.

Испытания на коррозионную стойкость цинк-наноалмазных покрытий проводили в 3% водном растворе  $NaCl$ . Каждый образец цинк-наноалмазного покрытия перед коррозионными испытаниями взвешивали на аналитических весах, затем помещали в водный раствор соли  $NaCl$  и выдерживали в течение 3 суток. Во время испытания образцы визуально осматривали и проводили промежуточное взвешивание. По окончании времени проведения коррозионных испытаний каждый образец высушивали фильтровальной бумагой, удаляли продукты коррозии, затем проводили контрольное взвешивание. Скорость коррозии для каждого образца рассчитывали по формуле:

$$K_i = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца, г;  $S$  – общая площадь поверхности образца, м;  $t$  – продолжительность испытания, год.

Среднюю скорость коррозии определяли по формуле:

$$K_{average} = \frac{\sum K_i}{n}, \quad (2)$$

где  $K_i$  – скорость коррозии  $i$  – образца;  $n$  – количество образцов.

### 3. Результаты и их обсуждение

Для определения размеров и формы НА использовался метод АСМ. Перед анализом коллоидный раствор НА обрабатывали ультразвуком, наносили на покровное стекло и высушивали. Как следует из результатов, частицы НА имеют форму, близкую к сферической, размером менее 90 нм (см. рис. 1 а, 1 б).

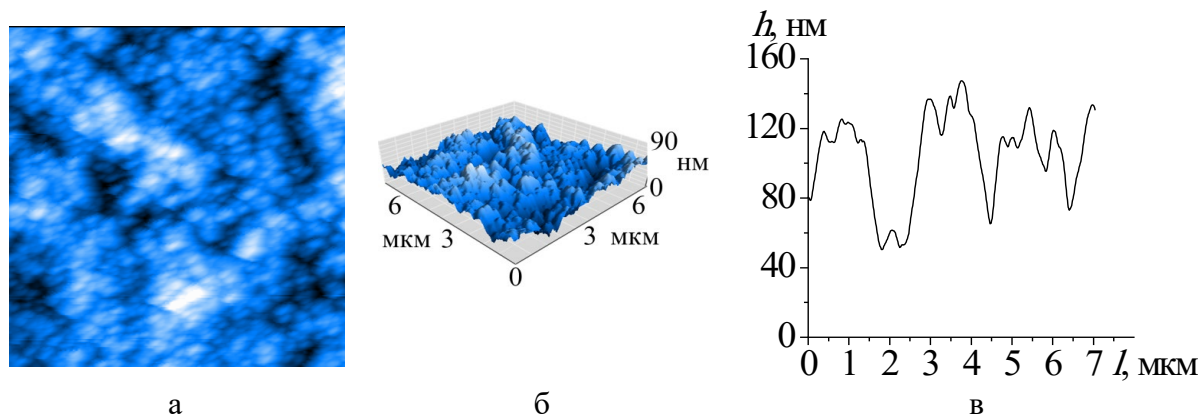


Рис. 1. Результаты АСМ НА: а – 2D-визуализация, б – 3D-визуализация, в – профиль сканирования.

Размеры частиц НА более 100 нм могут быть обусловлены агломерацией частиц в процессе пробоподготовки, и их достаточно близким расположением друг к другу ввиду их высокой концентрации в растворе. Сканирование профиля НА позволяет установить, что перепад высот в большей степени составляет менее 10 нм (см. рис. 1 в), что согласуется с результатами ранее проведенных исследований методом динамического рассеяния света [17]. При этом, так же выделяются области с большими перепадами, которые соответствуют агломерировавшимся частицам и участкам высокой концентрации НА с наложением их друг на друга. На рис. 1 а такие наложения НА и их агломерация соответствуют белым пятнам, свидетельствующим о накоплении большого количества частиц, которые существенно увеличивает перепад высот при сканировании.

Для установления фазового состава полученных покрытий и идентификации фазы НА в его объеме проводили рентгенофазовый анализ. Анализ рентгенограммы полученного в результате электролиза покрытия, модифицированного НА с концентрацией 3%, показывает, что пик в области значений угла дифракции  $2\theta$   $39^\circ$  согласуется со стандартной дифракционной картиной цинка (111) (см. рис. 2).

Области значений угла  $2\theta$  равные  $36^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $71^\circ$  также соответствуют фазам цинка  $Zn$  (002),  $Zn$  (101) и  $Zn$  (110) в покрытии соответственно. Диаграмма рентгеновской дифракции цинкового покрытия показывает пики окисления или присутствия оксида цинка. Пик, соответствующий значениям угла  $2\theta$   $63^\circ$ , указывает на наличие фазы оксида цинка в покрытии  $ZnO$  (103) соответственно. Особое внимание стоит уделить характеристическому пику в области  $2\theta$  равное  $44^\circ$ . Индексы Миллера 111 в данной области дифракционного угла представляют углеродную структуру и указывают на наличие алмазоподобной структуры [18].

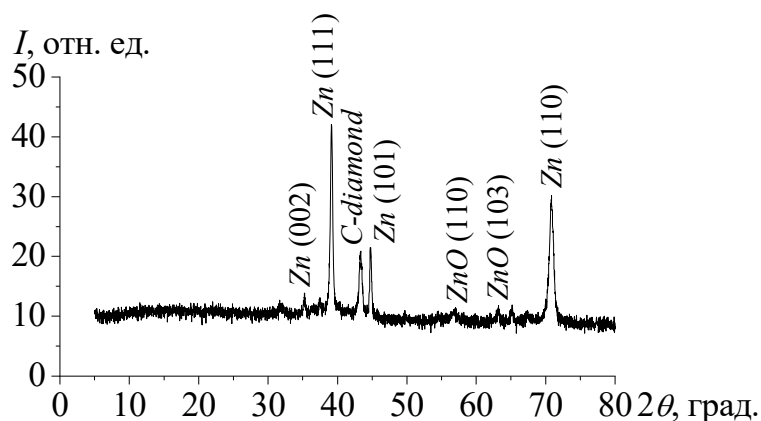


Рис. 2. Дифрактограмма цинкового покрытия, модифицированного НА.

Для сравнения морфологии поверхности покрытий проводили исследование методом СЭМ, которое указывает на его принципиальные отличия в зависимости от состава электролита цинкования. Анализ результатов СЭМ цинкового покрытия показывает, что на его поверхности имеются значительное количество неровностей в виде небольших углублений и пор (см. рис. 3 а), что может быть результатом неравномерного осаждения ионов цинка на стальную поверхность.

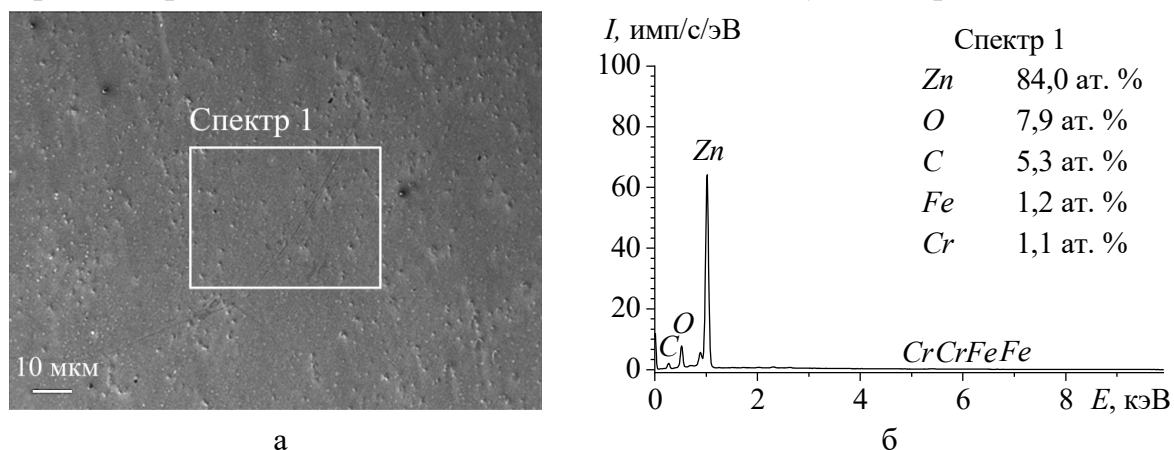


Рис. 3. СЭМ-изображение цинкового покрытия (а) и энергодисперсионный спектр (б).

При этом энергодисперсионный анализ указывает на наличие фазы цинка и оксида цинка с небольшим содержанием углерода, что является результатом взаимодействия электронного пучка с поверхностью стали при проведении анализа.

Анализ результатов СЭМ цинк-наноалмазных покрытий показывает противоположную морфологическую картину (см. рис. 4 а). Как видно из результатов, на поверхности присутствуют неровности и дефекты, однако, их отношение к общей площади незначительное. Стоит также отметить значительное повышение содержание фазы углерода в пробе (см. рис. 4 б), что доказывает присутствие НА в покрытии.

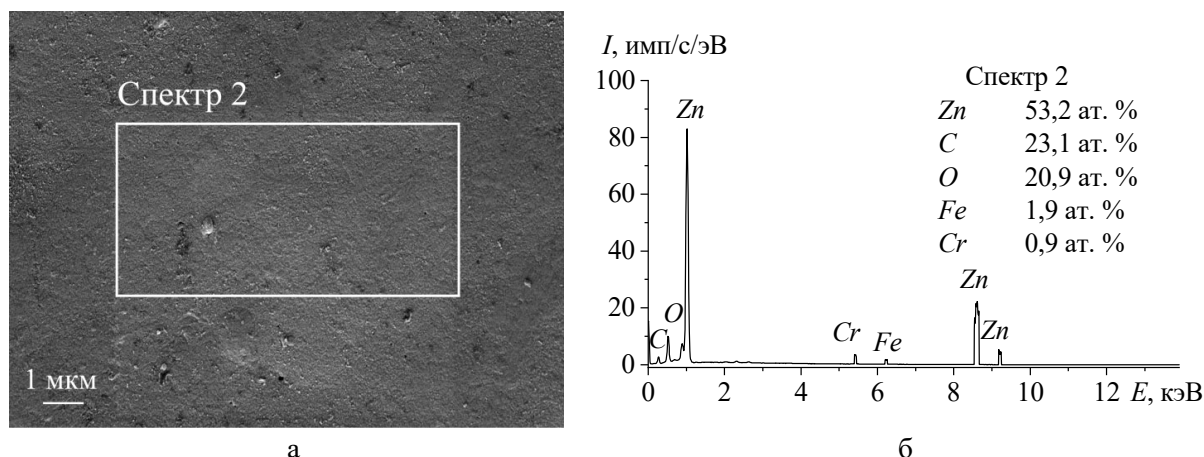


Рис. 4. СЭМ-изображение цинк-наноалмазного покрытия (а) и энергодисперсионный спектр (б).

Исследование антикоррозионных свойств полученных цинк-наноалмазных покрытий, выявило немонотонное изменение скорости коррозии в зависимости от концентрации НА в растворе цинкового электролита при электролизе, а также ее уменьшение в сравнении с цинковым покрытием без НА (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Результаты коррозионных испытаний электролитических цинковых покрытий, модифицированных НА.

Концентрация НА в электролите, %	Продолжительность испытаний, $t$ , год	Площадь поверхности образца, $S$ , м <sup>2</sup>	Масса образца до испытаний, $m_1$ , г	Масса образца после испытаний, $m_2$ , г	Потеря массы, $\Delta m$ , г	Скорость коррозии, $K_{average}$ , г/м <sup>2</sup> ·год
Прототип	0,019	0,0005	0,2284	0,2263	0,0021	221,05
0,5			0,2303	0,2321	0,0018	189,47
1			0,2311	0,2295	0,0016	168,42
3			0,2369	0,2360	0,0009	94,73
5			0,2496	0,2481	0,0015	157,89
7			0,2248	0,2235	0,0013	160,84

По-видимому, большое влияние на коррозионное поведение цинкового покрытия без наноалмазов по сравнению с цинк-наноалмазным покрытием играют его морфологические неровности и наличие глубоких впадин на поверхности, которые могут служить очагами доступа агрессивной среды к стальному образцу. Цинковое покрытие выполняет функции протекторной защиты. Возникновение гальванической пары цинковое покрытие – сталь ускоряет разрушение цинка, в связи с чем скорость коррозии основного металла увеличивается. Можно отметить, что анализ результатов коррозионных испытаний цинк-наноалмазных покрытий в водном растворе хлорида натрия ( $NaCl$ ) показывает, что оптимальной концентрацией НА является 3%. Данная концентрация НА в растворе электролита при получении электролитическим способом цинковых покрытий способствует снижению скорости коррозии до 94,73 г/м<sup>2</sup>·год, что на 42% ниже в сравнении со скоростью коррозии цинкового покрытия без наноалмазов.

#### 4. Заключение

В работе использованы наноалмазы в качестве модификаторов электролита цинкования для получения композиционных цинк-наноалмазных покрытий. Определено, что цинк-наноалмазные покрытия обладают повышенной коррозионной стойкостью в сравнении с цинковыми покрытиями. Выявлено, что концентрация наноалмазов в электролите цинкования оказывает существенное влияние на свойства покрытий. Установлено, что оптимальной концентрацией наноалмазов в электролите цинкования является 3%, скорость коррозии при этом снижается на 42%.

**Библиографический список:**

1. **Ramanauskas, R.** Microstructure and corrosion resistance of electrodeposited zinc alloy coatings / R. Ramanauskas, R. Juškėnas, A. Kaliničenko & L. F. Garfias-Mesias // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2004. – V. 8. – I. 6. – P. 416-421. DOI: 10.1007/s10008-003-0444-2.
2. **Alipour, K.** Effect of morphology and surface modification of silica nanoparticles on the electrodeposition and corrosion behavior of zinc-based nanocomposite coatings / K. Alipour, F. Nasirpour // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2019. – V. 166. – I. 2. – P D1-D9. DOI: 10.1149/2.0191902jes.
3. **Bellezze, T.** Electrochemical study on the corrosion resistance of Cr III-based conversion layers on zinc coatings / T. Bellezze, G. Roventi, R. Fratesi // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V. 155. – I. 2-3. – P. 221-230. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00047-6.
4. **El-Sharif, M.R.** Corrosion resistance of electrodeposited zinc-chromium alloy coatings / M.R. El-Sharif, Y.J. Su, C.U. Chisholm et al. // *Corrosion Science*. – 1993. – V. 35. – I. 5-8. – P. 1259-1265. DOI: 10.1016/0010-938X(93)90346-I.
5. **Awasthi, S.** Surface functionalized zinc composite coatings: a review / S. Awasthi, B.P. Palomero, A. Srivastava et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2025. – V. 27. – I. 2. – Art. № 2401597. – 22 p. DOI: 10.1002/adem.202401597.
6. **Kumar, M.K.P.** Electrochemical behavior of Zn–graphene composite coatings / M.K.P. Kumar, M.P. Singh, C. Srivastava // *RSC Advances*. – 2015. – V. 5. – I. 32. – P. 25603-25608. DOI: 10.1039/C5RA02898A.
7. **Rekha, M.Y.** Microstructure and corrosion properties of zinc-graphene oxide composite coatings / M.Y. Rekha, C. Srivastava // *Corrosion Science*. – 2019. – V. 152. – P. 234-248. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.03.015.
8. **Hamidon, T.S.** Potential of zinc based-graphene oxide composite coatings on mild steel in acidic solution / T.S. Hamidon, T.P. Yun, F.A. Zakaria et al. // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2021. – V. 98. – I. 12. – Art. № 100243. – 13 p. DOI: 10.1016/j.jics.2021.100243.
9. **Jena, G.** A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications / G. Jena, J. Philip // *Progress in Organic Coatings*. – 2022. – V. 173. – Art. № 107208. – 24 p. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107208.
10. **Asghar, M.S.A.** Zinc and graphene oxide composites as new protective coatings for oil and gas pipes / M.S.A. Asghar, M. Amir, U. Hussain, M.M. Sabri // *Polimery*. – 2023. – V. 68. – № 7-8. – P. 378-385. DOI: 10.14314/polimery.2023.7.3.
11. **Awasthi, S.** Nanodiamond-structured zinc composite coatings with strong bonding and high load-bearing capacity / S. Awasthi, B.P. Palomero, A. Srivastava et al. // *Nanoscale Advances*. – 2024. – V. 6. – I. 3. – P. 1001-1010. DOI: 10.1039/d3na00809f.
12. **Burkat, G.K.** The process of electrochemical deposition of zinc in the presence of boron-doped detonation nanodiamonds / G.K. Burkat, V.Y. Dolmatov, G.S. Aleksandrova et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2017. – V. 39. – I. 4. – P. 221-225. DOI: 10.3103/S1063457617040013.
13. **Burkat, G.K.** The corrosion resistance of zinc coatings in the presence of boron-doped detonation nanodiamonds (DND) / G.K. Burkat, G.S. Alexandrova, V.Y. Dolmatov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 175. – I. 1. – Art. № 012019. – 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/175/1/012019.
14. **Yu, M.** Microstructure, corrosion, and mechanical properties of compression-molded zinc-nanodiamond composites / M. Yu, C. George, Y. Cao et al. // *Journal of Materials Science*. – 2014. – V. 49. – I. 10. – P. 3629-3641. DOI: 10.1007/s10853-014-8066-x.
15. **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.
16. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: [www.url:https://www.icdd.com/pdf-2](http://www.url:https://www.icdd.com/pdf-2). – 15.06.2025.
17. **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.
18. **Ten, K.A.** Carbon condensation in detonation of high explosives / K.A. Ten, V.M. Titov, E.R. Pruel et al. // *Proceedings of the 15-th International Detonation Symposium, San Francisco, July, 13-18, 2015*. – San Francisco: Office of Naval Research, 2014. – P. 369-374.

**References:**

1. Ramanauskas R., Juškėnas R., Kaliničenko A., Garfias-Mesias L.F. Microstructure and corrosion resistance of electrodeposited zinc alloy coatings, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2004, vol. 8, issue 6, pp. 416-421. DOI: 10.1007/s10008-003-0444-2.
2. Alipour K., Nasirpour F. Effect of morphology and surface modification of silica nanoparticles on the electrodeposition and corrosion behavior of zinc-based nanocomposite coatings, *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, vol. 166, issue 2, pp. D1-D9. DOI: 10.1149/2.0191902jes.
3. Bellezze T., Roventi G., Fratesi R. Electrochemical study on the corrosion resistance of Cr III-based conversion layers on zinc coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 155, issue 2-3, pp. 221-230. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00047-6.
4. El-Sharif M.R., Su Y.J., Chisholm C. U. et al. Corrosion resistance of electrodeposited zinc-chromium alloy coatings, *Corrosion Science*, 1993, vol. 35, issue 5-8, pp. 1259-1265. DOI: 10.1016/0010-938X(93)90346-I.
5. Awasthi S., Palomero B.P., Srivastava A. et al. Surface functionalized zinc composite coatings: a review, *Advanced Engineering Materials*, 2025, vol. 27, issue 2, art. no. 2401597, 22 p. DOI: 10.1002/adem.202401597.
6. Kumar M.K.P., Singh M.P., Srivastava C. Electrochemical behavior of Zn-graphene composite coatings, *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 32, pp. 25603-25608. DOI: 10.1039/C5RA02898A.
7. Rekha M. Y., Srivastava C. Microstructure and corrosion properties of zinc-graphene oxide composite coatings, *Corrosion Science*, 2019, vol. 152, pp. 234-248. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.03.015.
8. Hamidon T.S., Yun T.P., Zakaria F.A. et al. Potential of zinc based-graphene oxide composite coatings on mild steel in acidic solution, *Journal of the Indian Chemical Society*, 2021, vol. 98, issue 12, art. no. 100243, 13 p. DOI: 10.1016/j.jics.2021.100243.
9. Jena G., Philip J. A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications, *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 173, art. no. 107208, 24 p. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107208.
10. Asghar M.S.A., Amir M., Hussain U., Sabri M.M. Zinc and graphene oxide composites as new protective coatings for oil and gas pipes, *Polimery*, 2023, vol. 68, no. 7-8, pp. 378-385. DOI: 10.14314/polimery.2023.7.3.
11. Awasthi S., Palomero B.P., Srivastava A. et al. Nanodiamond-structured zinc composite coatings with strong bonding and high load-bearing capacity, *Nanoscale Advances*, 2024, vol. 6, issue 3, pp. 1001-1010. DOI: 10.1039/d3na00809f.
12. Burkat G.K., Dolmatov V.Y., Aleksandrova G.S. et al. The process of electrochemical deposition of zinc in the presence of boron-doped detonation nanodiamonds, *Journal of Superhard Materials*, 2017, vol. 39, issue 4, pp. 221-225. DOI: 10.3103/S1063457617040013.
13. Burkat G.K., Alexandrova G.S., Dolmatov V.Y. et al. The corrosion resistance of zinc coatings in the presence of boron-doped detonation nanodiamonds (DND), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 175, issue 1, art. no. 012019, 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/175/1/012019.
14. Yu M., George C., Cao Y. et al. Microstructure, corrosion, and mechanical properties of compression-molded zinc-nanodiamond composites, *Journal of Materials Science*, 2014, vol. 49, issue 10, pp. 3629-3641. DOI: 10.1007/s10853-014-8066-x.
15. 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.
16. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). Available at: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](https://www.icdd.com/pdf-2) (accessed 15.06.2025).
17. 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.
18. Ten K.A., Titov V.M., Prueel E.R. et al. Carbon condensation in detonation of high explosives, *Proceedings of the 15-th International Detonation Symposium*, San Francisco, July, 13–18, 2015, San Francisco, Office of Naval Research, 2014, pp. 369-374.