



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-106-110>
УДК 621.785.53

Поступила 14.04.2026
Received 14.04.2026

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Л. А. АСТРЕЙКО, П. С. МЫШКЕВИЧ, А. В. ДЫЛЕВСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: NIL_USI@bntu.by

В статье рассматриваются современные подходы к повышению качества цинковых покрытий и их эффективности в защите металлов от коррозии, а также к улучшению декоративных свойств. Освещаются основные принципы термодиффузионного цинкования и роль пассивации в повышении коррозионной стойкости. Рассматривается получение легированных цинковых покрытий через введение меди, никеля, молибдена, алюминия в состав насыщающей среды. Подчеркивается тенденция к интеграции химико-термических и электрохимических технологий для создания многофункциональных систем, отвечающих высоким требованиям современного дизайна.

Ключевые слова. Цинковые покрытия, декоративные свойства, антикоррозионная защита, пассивация, комплексные покрытия, легированные цинковые покрытия.

Для цитирования. Астрейко, Л. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства комплексных термодиффузионных покрытий, работающих в условиях электрохимической коррозии / Л. А. Астрейко, П. С. Мышкевич, А. В. Дылевский // *Литье и металлургия*. 2026. № 2. С. 106–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-106-110>.

SURFACE QUALITY AND OPERATIONAL PROPERTIES OF COMPLEX THERMODIFFUSION COATINGS OPERATING UNDER CONDITIONS OF ELECTROCHEMICAL CORROSION

L. A. ASTREYKO, P. S. MYSHKEVICH, A. V. DYLEVSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: NIL_USI@bntu.by

The paper discusses modern approaches to improving the quality of zinc coatings and their effectiveness in protecting metals from corrosion, as well as improving their decorative properties. It highlights the basic principles of thermomdiffusion zinc plating and the role of passivation in enhancing corrosion resistance. The paper also discusses the production of alloyed zinc coatings by introducing copper, nickel, molybdenum and aluminum into the sating medium. The paper emphasizes the trend towards integrating chemical-thermal and electrochemical technologies to create multifunctional systems that meet the high requirements of modern design.

Keywords. Zinc coatings, decorative properties, anti-corrosion protection, passivation, complex coatings, alloyed zinc coatings.

For citation. Astreyko L. A., Myshkevich P. S., Dylevsky A. V. Surface quality and operational properties of complex thermomdiffusion coatings operating under conditions of electrochemical corrosion. *Foundry production and metallurgy*, 2026, no. 2, pp. 106–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-106-110>.

В современном промышленном дизайне эстетическое проектирование тесно связано с конструктивным, учитывая форму изделий, цвет и фактуру [1, 2]. Актуальным является не только срок службы изделия, но и их моральное старение, которое определяется эстетическими предпочтениями того или иного времени. Например, цинковое покрытие, полученное методом термодиффузионного цинкования (ТДЦ), который позволяет получать сплошной и равномерный по толщине слой даже на изделиях любой сложной формы, визуально может иметь матовый темно-серый или светлый матовый оттенок серого цвета, что не всегда воспринимается потребителем как «красивое» [3].

Декоративность поверхности для заказчика состоит в привлекательности внешнего вида, что включает для цинковых покрытий такие параметры, как плотность поверхностного слоя (бездефектность), цветность, отражающая способность (блеск), сниженная скорость образования оксида [1]. При расчете коррозионной стойкости покрытий обычно учитывают правило Таммана (соотношение атомов основного металла и легирующего элемента); электродные потенциалы элементов; фазовый состав основного

материала и покрытия; дисперсность и локацию фаз в приповерхностном объеме. Причем эти четыре аспекта расчета коррозионной стойкости часто взаимосвязаны: например, определенное соотношение атомов (правило Таммана) может влиять на фазовый состав и, как следствие, на электродные потенциалы основных и легирующих фаз. Более того, бездефектность и дисперсность фаз напрямую определяют возможность проникновения агрессивной среды к основному металлу, что является ключевым фактором в оценке реальной коррозионной стойкости. Таким образом, комплексный подход, учитывающий как макроскопические декоративные параметры, так и микроструктурные характеристики, позволяет более точно предсказывать долговечность и внешний вид цинковых покрытий. Диффузионным способом можно получить беспористые цинковые покрытия небольшой толщины, например, 25–30 мкм. По результатам рентгеноструктурного анализа цинковых покрытий, полученных в насыщающих средах с содержанием цинка более 60%, установлено наличие на поверхности оцинкованных изделий из углеродистой стали следов ζ -фазы. Причем данная фаза не располагается по всей обработанной поверхности [1].

На поверхности металла, находящегося в электролите, возникают короткозамкнутые гальванические элементы, для работы которых требуется разделение поверхности на катодные и анодные участки. Причины возникновения электрохимической неоднородности могут быть разными:

- различная концентрация твердого раствора (пример – ζ -фаза на поверхности покрытия, полученного в порошковых средах);
- наличие несплошных оксидных пленок, пористость защитных пленок, или, возможно, неравномерное распределение на поверхности продуктов коррозии;
- неоднородность жидкой фазы – различие в концентрациях собственных ионов металла в электролите, различных солей, ионов водорода, кислорода и других окислителей;
- различие температур на участках поверхности металла, неравномерное распределение внешнего электрического поля, неодинаковая освещенность поверхности металла и т.п. [1, 4, 5].

Поэтому направление получения на поверхности металлических изделий легированных цинковых покрытий является актуальным и экономически выгодным, так как не усложняет технологический процесс, не увеличивая его стадийность. Например, добавление меди (Cu) в состав насыщающей смеси для последующей химико-термической обработки (ХТО) позволяет получить декоративное защитное покрытие, что дает возможность создавать медно-цинковые сплавы, которые могут быть высокодекоративными благодаря их золотистому или желтоватому цвету, регулируемому соотношением Zn/Cu. При смешивании порошков Zn и Cu или при нанесении Zn на основание, содержащее Cu, с дальнейшим отжигом происходит взаимная диффузия металлов и образование интерметаллидов Zn–Cu, например, γ -фаза $\text{Cu}_5\text{Zn}_{21}$ и β -фаза CuZn . Такие покрытия обычно тверже и более износостойкие, чем покрытия Zn–Ni: их микротвердость может возрасти на сотни процентов, что существенно повышает стойкость к механическим повреждениям и дольше сохраняет требуемый внешний вид поверхности [6–15].

С использованием диаграмм Пурбе можно предварительно оценить поведение элементов, находящихся в составе поверхности. Интерес представляет анализ введения в состав поверхности таких элементов, как Cu, Al, Mo, W, Cr. Предварительный анализ влияния компонентов проводили на основании трехкомпонентных диаграмм путем наложения. Результаты анализа приведены в таблице. Внешний вид изделий после термодиффузионного цинкования в комплексных составах насыщающих сред показан на рис. 1.

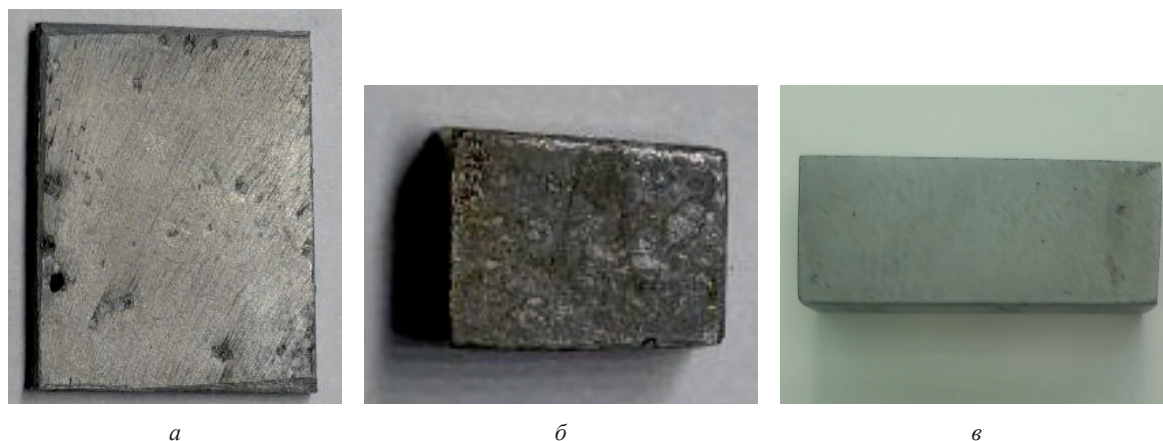


Рис. 1. Внешний вид изделий после термодиффузионного цинкования с добавкой в насыщающую смесь: а – Cu; б – Mo; в – традиционная смесь на основе порошка ПЦ-1

Эффективным приемом для повышения защитной способности и долговечности, что влияет на сохранение эстетического вида, является дополнительное легирование цинковых покрытий металлами подгруппы железа, такими, как никель (Ni) или кобальт (Co). Например, цинк-никелевые (Zn-Ni) покрытия являются антикоррозионными анодного типа, обладающими улучшенной адгезией к основе. Фазовый состав такого покрытия может быть представлен фазой Ni₅Zn₂₁ и твердым раствором никеля в цинке (см. таблицу) [15]. Проведенный анализ показал наиболее перспективными системы с содержанием Ni, Cu, Mo.

Поведение элементов в условиях водных сред различной pH

pH среды	Элементы в составе термодиффузионного покрытия				
	Fe-Zn-Cr	Fe-Zn-Cu-Al	Fe-Zn-Mo	Fe-Zn-W	Fe-Zn-Ni
<4 (кислая среда)	Все элементы активны: $Fe \rightarrow Fe^{2+}$ $Zn \rightarrow Zn^{2+}$ $Cr \rightarrow Cr^{3+}$	Активен Al, Cu активна в очень кислых средах, $Fe \rightarrow Fe^{2+}$ $Zn \rightarrow Zn^{2+}$	Активная коррозия: $Fe \rightarrow Fe^{2+}$ $Zn \rightarrow Zn^{2+}$ $Mo \rightarrow Mo^{3+}/Mo^{4+}$	Активен цинк $Zn \rightarrow Zn^{2+}$, $W \rightarrow WO_3$	Активны все элементы
~7 (нейтральная среда)	Образуется стабильная оксидная пленка: Fe_2O_3 , ZnO , Cr_2O_3	$Al \rightarrow Al_2O_3$ $Zn \rightarrow ZnO$, $Zn(OH)_2$ (пассивиров.)	Образуются оксидные пленки: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ZnO , $Zn(OH)_2$, MoO_2 (Mo пассивирует Fe, создавая комплексный оксид)	Образуются оксидные пленки (пассивный): ZnO , $Zn(OH)_2$, Fe_3O_4	$Zn \rightarrow Zn(OH)_2$ (пассивный), $Ni \rightarrow NiO$ (катод по отношению к Zn, Fe)
>10-12 (щелочная среда)	Fe, Cr пассивны, Zn растворяет. ZnO_2^{2-}	Поверхность активна: $[Zn(OH)_4]^{2-}$ $[Al(OH)_4]^-$ Пассивируется медь: $Cu \rightarrow Cu_2O$, CuO	Образуются оксидные пленки: Растворимые MoO_4^{2-} $HZnO_2$; Fe пассивно	Образуются пассивные оксидные пленки: ZnO , $Zn(OH)_2$; Fe пассивируется до Fe_3O_4	Образуется очень прочная пленка $Ni(OH)_2$
Особенности		Самое опасное место – границы с контактом Al-Cu, в этих местах возникает максимальная разность потенциала		Образуется комплексный оксид $FeWO_4$, повышающий коррозионную стойкость	При недостатке O_2 оксидные пленки формируются хуже, может появиться питтинговая коррозия в местах контакта металлов

Недостаточную эстетическую привлекательность классических термодиффузионных цинковых покрытий, проявляемую в отсутствии глянца и приглушенном блеске, можно скорректировать использованием, например, дуплексного покрытия, получаемого методом «холодного алитирования» (рис. 2). Термодиффузионный цинковый слой обеспечивает высокую адгезию для последующих покрытий [15]. Такое покрытие, обладающее природным цветом и блеском, значительно повышает товарный вид конечной продукции. Помимо высоких декоративных свойств, дуплексное покрытие обеспечивает повышение коррозионной стойкости. Комбинация барьерной и протекторной защиты, усиленная различными



Рис. 2. Внешний вид изделий с дуплексным цинковым и алюминиевым покрытием [16]

по составу и структуре слоями, значительно продлевает срок службы изделий в атмосферных условиях различных микроклиматических районов, демонстрируя повышенную устойчивость в агрессивных средах, чего можно не достичь в легированных цинковых покрытиях для кислых и щелочных сред (см. таблицу). Благодаря формированию интерметаллического слоя при взаимодействии молекул алюминия и цинка при умеренном нагреве достигаются высокие жаропрочные характеристики, защищающие основной металл от термического повреждения [16].

Таким образом, повышение декоративных свойств цинковых покрытий напрямую связано с их эксплуатационными характеристиками и достигается получением комплексных многофункциональных систем. Проведенный анализ показал наиболее перспективными системы с содержанием Ni, Cu, Mo. Подобные системы позволяют обеспечить не только высокий декоративный потенциал, но и устойчивость к агрессивным средам, расширяя практическое применение цинковых покрытий. Важно учитывать, что даже незначительные изменения в процентном содержании компонентов могут кардинально изменить свойства конечного продукта, поэтому тонкая корректировка состава является ключевым этапом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cross-sectional TEM observation of multilayer structure of a galvanized steel / T. Kato [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1998. – Vol. 319. – P. 132–139.
2. **Бабкин, О. Э.** Технологии покрытий: учеб. пособие / О. Э. Бабкин, В. В. Ильина. – СПб.: СПбГИКИТ, 2016. – 82 с.
3. Основы материаловедения в промышленном дизайне: текст лекций / сост. О. В. Ильина. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – 60 с.
4. **Лошкарёв, Ю. М.** / Ю. М. Лошкарёв, В. И. Коробов, В. В. Трофименко // *Защита металлов*. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 79–84.
5. Диффузионное насыщение и покрытие на металлах / А. Г. Тюрин [и др.]. – Киев, 1988. – С. 11–26.
6. **Астрейко, Л. А.** Защитные цинксодержащие покрытия: зависимость свойств от декоративности / Л. А. Астрейко // *Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ Респ. науч.-техн. конф.* – Минск: БНТУ, 2021. – С. 147–148.
7. **Проскуркин, Е.** Защитные цинковые покрытия: сопоставительный анализ свойств, рациональные области применения / Е. Проскуркин // *Оборудование*. – 2005. – № 3, 4.
8. **Тарасевич, А. В.** Бесхромовая пассивация цинковых покрытий в растворах, содержащих оксоанионы переходных металлов / А. В. Тарасевич // XXVIII Респ. конкурс науч. работ студентов. – Минск, 2022. – С. 140–141.
9. К вопросу исследования коррозионной стойкости цинковых покрытий, в том числе с дополнительной их обработкой пассивацией и лакокрасочным материалом / Н. И. Урбанович [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2025. – № 3. – С. 120–128.
10. **Матыс, В. Г.** Конверсионные покрытия на цинке, полученные из молибдат-фосфатных растворов с добавками ионов переходных металлов / В. Г. Матыс, В. А. Ашуйко, Л. Н. Новикова // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. – 2019. – № 2. – С. 127–136.
11. PVD for decorative applications: a review / M. Vorobyova [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, iss. 14. – P. 4919.
12. **Schaefer, K.** Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc / K. Schaefer, A. Miszczyk // *Corrosion Science*. – 2013. – Vol. 66. – С. 380–391.
13. **Golovin, V. A.** Current trends in the modification of zinc-filled polymer coatings / V. A. Golovin, S. A. Tyurina // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. – 2020. – Vol. 9, no. 2. – P. 372–393.
14. Green approaches, potentials, and applications of zinc oxide nanoparticles in surface coatings and films / R. Rohani [et al.] // *Bioinorganic Chemistry and Applications*. – 2022. – No. 1. – P. 3077747.
15. **Асталюхина, А. С.** Характеристика современных методов нанесения защитных цинковых покрытий / А. С. Асталюхина, Е. С. Пикалов // *Успехи современного естествознания*. – 2015. – № 11. – С. 11–14.
16. **Астрейко, Л. А.** Зависимость параметров качества поверхности от состава многокомпонентного цинкового слоя на стали / Л. А. Астрейко, П. С. Мышкевич, А. В. Дылевский // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр.* – Минск, 2025. – Вып. 14. – С. 342–346.

REFERENCES

1. **Kato T., Hong M. H., Nunome K.** [et al.] Cross-sectional TEM observation of multilayer structure of a galvanized steel. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 319, pp. 132–139.
2. **Babkin O. E., Pyina V. V.** *Tekhnologii pokrytij: ucheb. posobie* [Coating technologies: textbook]. St. Petersburg, SPbGIKIT Publ., 2016, 82 p.
3. **Pyina O. V.** (comp.) *Osnovy materialovedeniya v promyshlennom dizajne: tekst lekcij* [Fundamentals of Materials Science in Industrial Design: lecture notes]. St. Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2025, 60 p.
4. **Loshkarev Yu. M., Korobov V. I., Trofimenko V. V.** *Zaschita metallov = Protection of Metals*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 79–84.
5. **Tyurin A. G., Yaseneva O. Yu., Aleksandrov V. N.** [et al.] *Diffuzionnoe насыshchenie i pokrytie na metallah* [Diffusion saturation and coating on metals]. Kyiv, 1988, pp. 11–26.
6. **Astreiko L. A.** Zashchitnye cinksoderzhashchie pokrytiya: zavisimost' svoystv ot dekorativnosti [Protective zinc-containing coatings: dependence of properties on decorativeness]. *Sovremennyye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sb. nauch. rabot Rесп. nauch.-tekhn. konf. = Modern technologies for procurement production: collection of scientific papers of the Republican scientific and technical conference*. Minsk, BNTU Publ., 2021, pp. 147–148.
7. **Proskurkin E.** Zashchitnye cinkovye pokrytiya: sopostavitel'nyj analiz svoystv, racional'nye oblasti primeneniya [Protective zinc coatings: comparative analysis of properties, rational areas of application]. *Oborudovanie = Equipment*, 2005, no. 3, 4.

8. **Tarasevich A.V.** Beskromovaya passivaciya cinkovyh pokrytij v rastvorah, soderzhashchih oksokationy perekhodnyh metall-ov [Chromium-free passivation of zinc coatings in solutions containing transition metal oxocations]. *XXVIII Resp. konkurs nauch. rabot studentov = XXVIII Rep. competition of students' scientific works*. Minsk, 2022, pp. 140–141.
9. **Urbanovich N.I., Baranovsky K.E., Bendik T.I.** [et al.] K voprosu issledovaniya korrozionnoj stojkosti cinkovyh pokrytij, v tom chisle s dopolnitel'noj ih obrabotkoj passivaciej i lakokrasochnym materialom [On the issue of studying the corrosion resistance of zinc coatings, including their additional treatment with passivation and paint and varnish material]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 3, pp. 120–128.
10. **Matys V.G., Ashuyko V.A., Novikova L.N.** Konversionnye pokrytiya na cinke, poluchennye iz molibdat-fosfatnyh rastvorov s dobavkami ionov perekhodnyh metallov [Conversion coatings on zinc obtained from molybdate-phosphate solutions with additives of transition metal ions]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Himicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology*, 2019, no. 2, pp. 127–136.
11. **Vorobyova M.** [et al.] PVD for decorative applications: a review. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 14, p. 4919.
12. **Schaefer K., Miszczyk A.** Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc. *Corrosion Science*, 2013, vol. 66, pp. 380–391.
13. **Golovin V.A., Tyurina S.A.** Current trends in the modification of zinc-filled polymer coatings. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 372–393.
14. **Rohani R.** [et al.] Green approaches, potentials, and applications of zinc oxide nanoparticles in surface coatings and films. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2022, no. 1, p. 3077747.
15. **Astalyukhina A.S., Pikalov E.S.** Harakteristika sovremennyh metodov naneseniya zashchitnyh cinkovyh pokrytij [Characteristics of modern methods of applying protective zinc coatings]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in modern natural science*, 2015, no. 11, pp. 11–14.
16. **Astreyko L.A., Myshkevich P.S., Dylevsky A.V.** Zavisimost' parametrov kachestva poverhnosti ot sostava mnogokomponent-nogo cinkovogo sloya na stali [Dependence of surface quality parameters on the composition of a multicomponent zinc layer on steel]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr. = Actual issues of mechanical engineering: collection of scientific papers*. Minsk, 2025, iss. 14, pp. 342–346.