

УДК 669.018.8-034.5(043.2)

DOI: 10.18372/0370-2197.4(105).19387

О. О. МІКОСЯНЧИК, М. А. ШТЕЙНИК, С. Р. МНАЦАКАНОВ,
К. В. ЖИВНОВИЦЬКИЙ, В. С. ДУБОВИК

Національний авіаційний університет, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ НА СТАЛІ

Проведено аналіз захисних властивостей цинкового покриття на металевих поверхнях, його термін служби залежно від товщини покриття та умов експлуатації. Наведено особливості технологічного процесу антикорозійного захисту металевих конструкцій методом гарячого цинкування. Досліджено інтенсивність корозійних процесів в цинковому покритті в агресивних та неагресивних середовищах. Встановлено інтенсивне руйнування покриття в розчині лимонної кислоти та поступове окислення покриття з утворенням білої іржі в воді та розчині NaCl. Наведено результати зношування цинкового покриття в абразивному середовищі та проаналізовано вплив зовнішніх чинників та абразиву на мікротвердість покриття.

Ключові слова: *тертя, покриття, зношування, абразив, корозія, мікротвердість, випробування, окислення.*

Вступ. У процесі експлуатації металевих конструкцій можуть виникати різні види корозії: атмосферна, електрохімічна, біокорозія, виразкова та ін. [1]. Наслідками корозії є порушення цілісності, руйнування матеріалу, втома, крихкість, розломи, негерметичність, а також зміна форми та якості поверхні, погіршення зовнішнього вигляду, зміна технічних параметрів, зміна функціональних властивостей тощо.

Гаряче цинкування є одним із ефективних методів захисту сталі від корозії при відносно низьких експлуатаційних витратах на покриття. Стандарти ДСТУ Б В.2.6-193:2013; ISO 1461:2009; ISO 1461 / BS EN ISO 1461; ДСТУ ISO 14713-2:2020 та ін. забезпечують технічні та якісні вимоги до гарячого цинкування сталевих деталей.

Технологія гарячого цинкування заснована на формуванні на поверхні сталеві деталі легованого покриття з гарячого цинку. Цинкування є складним процесом дифузійних реакцій, розчинення, вторинної кристалізації та термодинамічних змін [2]. Цинкові покриття діють як бар'єр на поверхні сталі, а також захищають її як тимчасовий анод. Як правило, у випадку корозії цинк захищає залізу або сталеву підкладку за допомогою жертвовного захисту – її шари покриваються окисленими продуктами, відомими як «біла іржа» [3].

Дослідження впливу різних чинників навколишнього середовища на стійкість цинкового покриття на сталі дозволить визначити механізми протікання корозійних процесів та встановити фактори, що знижують захисні властивості оцинкованого металу.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. У виборі антикорозійного захисту основна увага приділяється швидкості руйнування основного покриття та необхідності його відновлення. Гаряче цинкування є одним із найважливіших і надійних методів захисту від корозії для широкого

діапазону сталевих компонентів у багатьох сферах застосування. У Європі 1,3 мільйона тонн цинку використовується для гарячого цинкування приблизно 33 мільйонів тонн сталі щороку за допомогою двох виробничих технологій: безперервного гарячого цинкування для тонких листів і серійного гарячого цинкування для готових виробів або напівфабрикатів із сталі [4].

Цинкові покриття мають багато переваг, зокрема забезпечують бар'єрний захист сталі від корозії та є стійкими до механічних пошкоджень. Їх використання постійно зростає, охоплюючи дедалі складніший асортимент продукції, включаючи чавун, термічно оброблену сталь, сталевий дріт та ін. [5].

Переваги методу гарячого цинкування, у порівнянні з холодним, гальванічним, газотермічним та термодифузійним методами: висока стійкість до корозії, ефективна адгезія між цинковим прошарком та основним металом, тривалий термін служби, висока стійкість до механічних пошкоджень, економічна ефективність [6].

Термін служби стандартного оцинкованого покриття завтовшки 85 мкм у більшості середовищ може досягати 50 років [7], за іншими даними оптимальна товщина оцинкованого покриття із терміном служби 10–20 років у типових промислових умовах, наприклад, коливається від 50 до 100 мкм, тоді як отримання товстих проміжних фаз покриття до 400 мкм небажано з механічної точки зору через їхню крихку природу [8]. В роботі [9] проаналізовано, що швидкість корозії оцинкованого покриття становить 0,1 мкм/рік - 2 мкм/рік для більшості зовнішніх чинників. Найбільш агресивна корозія відбувається у промислових та морських умовах експлуатації (швидкість може досягати 5-12 мкм/рік, залежно від складу та ступеню забрудненості середовища, виду покриття та методу його нанесення) [7].

Оцінка твердості сформованого цинкового покриття має першочергове значення для забезпечення надійного механічного захисту сталі від потенційних пошкоджень під час транспортування та експлуатації. Відповідність технологічного процесу гарячого цинкування стандартам ISO дозволяє сформувати покриття з підвищеною твердістю, яке не тільки зміцнює структурну цілісність сталі, але й зменшує ризик стирання, ударів і зносу протягом терміну служби, тим самим підвищуючи її загальну міцність і довговічність.

Мета роботи полягала в дослідженні інтенсивності протікання корозійних процесів в цинковому покритті в агресивних та неагресивних середовищах та в визначенні стійкості цинкового покриття до впливу вільного абразиву.

Технологічний процес антикорозійного захисту металевих конструкцій методом гарячого цинкування. З 2011 року ТОВ «Компанія «Метал Інвест»» (Україна, м. Черкаси) спеціалізується на гарячому цинкуванні металоконструкцій. Виробництво укомплектовано сучасною лінією гарячого цинкування фірми Western Technologies. Виробнича лінія містить ванну цинкування розміром 14,0 м * 3,2 м * 1,6 м, яка є найбільшою в Україні та однією з найбільших в Європі [10]. З 2014 року Компанія «Метал Інвест» отримала сертифікат відповідності стандарту ISO 1461:2009 «Покриття, нанесені методом гарячого цинкування на готові вироби зі сталі та заліза».

Технологічний процес антикорозійного захисту металевих конструкцій методом гарячого цинкування складається з послідовних операцій, до яких можна віднести наступні:

- навішування матеріалу на спеціальні траверси, що переміщуються кран-балками і тельферами;
- знежирення шляхом занурення у розчин (90% води і 10% концентрованого знежирювача) при температурі 25° С на 5-15 хвилин;
- травлення шляхом занурення у 15% розчин соляної кислоти при температурі навколишнього середовища цеху на 30-90 хвилин;
- промивання виробів водою, при температурі цеху;
- флюсування шляхом занурення у розчин солей хлористого амонію (NH₄Cl) і хлористого цинку (ZnCl₂), з концентрацією 500 г/л при температурі 40 °С, на 30 - 45 секунд;
- сушка гарячим повітрям в печі при температурі 120 °С;
- цинкування шляхом занурення металоконструкцій в розплавлений цинк при температурі 450°С - 455°С.
- охолодження виробів на повітрі, контроль якості покриття.

Одержане за наведеною технологією дифузійне цинкове покриття складається з декількох залізоцинкових фаз, розташованих безпосередньо на основному металі, і шару цинку. Товщина покриття для сталей при однаковому стані їх поверхні залежить від тривалості цинкування, температури розплаву цинку і його складу, а також від швидкості виймання виробів з ванни цинкування. Товщина цинкового покриття за наведеною технологією повинна бути не менше 40 мкм.

Експериментальне обладнання та методика дослідження. Проведено дослідження корозійної стійкості цинкового покриття, сформованого на сталі 09Г2С методом гарячого цинкування в умовах впливу зовнішніх чинників протягом 30 днів (табл. 1).

Таблиця 1

Умови навколишнього середовища при оцінці корозійної стійкості цинкового покриття

№ зразку	Умови
1	Приміщення, середня вологість повітря 35...50 %, температура +20...+30 °С
2	Ґрунт темно-сірий опідзолений
3	H ₂ O дистильована, температура -15...+30 °С
4	H ₂ O+3% NaCl, температура -15...+30 °С
5	H ₂ O+ 1% лимонної кислоти, температура -15...+30 °С

Після 30 днів впливу зовнішніх чинників на цинкове покриття проведено випробування зразків на абразивне зношування у вільному не жорстко закріпленому абразиві на експериментальній установці відповідно до ГОСТ 23.208-79 [11]. В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO₂) зернистістю 250 мкм (вологість не перевищувала 0,16%). Експерименти проводили протягом 20 хв. при швидкості обертання гумового ролика 0,158 м/с, навантажені 44,1 Н.

Ваговий знос покриттів визначали на вагах Axis ANG200C 2-го класу точності з дискретністю 0,0001 г. Зовнішню поверхню зразків досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Результати досліджень та їх аналіз. Наявність електропровідного середовища (розчинів кислот, лугів, солей) призводить до реалізації електрохімічного виду корозії в цинковому покритті.

Встановлено, що цинкове покриття активно кородує в розчині лимонної кислоти, рН розчину становить 2,2. Це підтверджує те, що цинк є амфотерним металом і проявляє стійкість лише в нейтральному середовищі. В проведених експериментах при температурі $-15...+30$ °С (8 годин заморожування з наступним розморожуванням) встановлено, що протягом перших п'яти днів відбувається активне руйнування цинкового покриття. На 30-й день на 90% площі сталі 09Г2С цинкове покриття стало крихке та легко відшаровувалось (рис. 1).

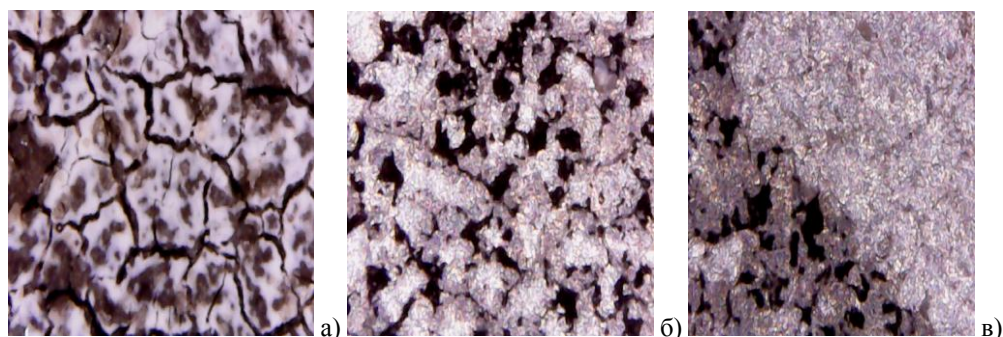


Рис. 1. Корозія цинкового покриття в розчині $H_2O + 1\%$ лимонної кислоти: а) - верхній шар; б), в) - руйнування покриття, поява зон основного металу.

Внаслідок протікання електрохімічної корозії в цинковому покритті в розчині з лимонною кислотою встановлено зниження мікротвердості в 1,76 разів, в порівнянні з покриттям зразку 1 (рис. 2).

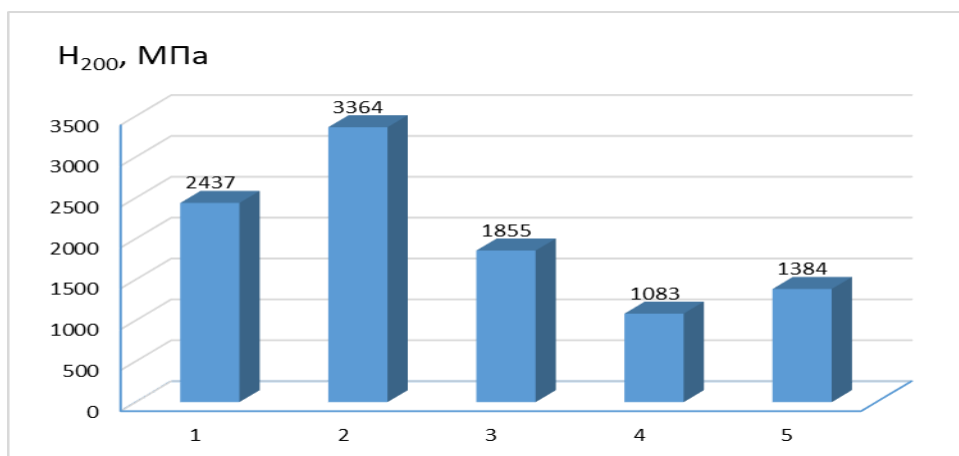
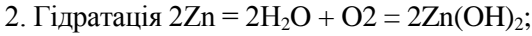
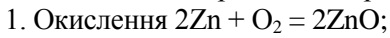


Рис. 2. Мікротвердість цинкового покриття дослідних зразків за умов впливу чинників навколишнього середовища згідно табл. 1.

Розглянемо вплив води на корозійну стійкість цинкового покриття. Для дослідного зразку, який був в ґрунті протягом 30 днів, встановлено підвищення мікротвердості поверхневих шарів цинкового покриття в 1,38 разів. Механізм

цього процесу полягає в формуванні оксидно-карбонатної плівки при наявності води. В липні-серпні 2024 року, під час проведення експериментів, точка роси становила 15...20 °С. Хімічні реакції, які відбуваються при формуванні оксидно-карбонатної плівки, протікають протягом 14 днів:



Формування карбонату цинку на третьому етапі забезпечує надійний антикорозійний захист цинкового шару при впливі вологи. В умовах відносно сухого середовища протікають всі три реакції, і на поверхні оцинкованого виробу формується оксидно-карбонатна плівка, майже непроникна для кисню і вологи, різко обмежує подальший процес взаємодії цинку з киснем та підвищує корозійну стійкість покриття.

В дослідних зразках 3 та 4, за умов постійного впливу води, підведення вуглекислого газу та кисню утруднено. У цьому випадку відбуваються лише фази окиснення та гідратації цинкового покриття. В результаті цього формується білий осад (гідроксид і оксид цинку), відбувається поступове окислення та розвиток процесів утворення білої іржі (рис. 3).

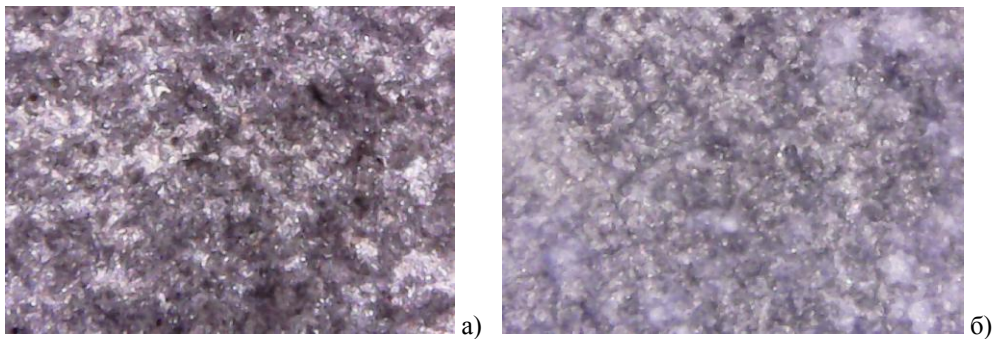


Рис. 3. Зовнішній вид цинкового покриття на сталі 09Г2С: а) – зразок 1 (приміщення), б) – зразок 4 ($\text{H}_2\text{O}+3\%\text{NaCl}$).

Через 20 днів за умов впливу дистильованої води або 3% розчину NaCl при температурі -15...+30 °С (8 годин заморожування з наступним розморожуванням) проявляються ознаки розтріскування покриття. В умовах експерименту не встановлено суттєвих відмінностей щодо швидкості протікання корозійних процесів в цинковому покритті в дистильованій воді та при наявності у воді NaCl. Однак, відбувається суттєве зниження мікротвердості поверхневих шарів цинкового покриття – в 1,31 та в 2,25 разів встановлено зменшення даного показника за умов впливу води та розчину з NaCl, в порівнянні з покриттям при кімнатній температурі (рис. 2).

Результати досліджень дослідних зразків на абразивне зношування у вільному не жорстко закріпленому абразиві свідчать, що ваговий знос підвищується в 1,16, 1,25, 1,3 та 1,62 рази для зразків після витримки протягом 30 днів в ґрунті, дистильованій воді, розчинах NaCl та лимонної кислоти відповідно, в порівнянні з показниками зносу для зразка, що знаходився в приміщенні (рис. 4).

Аналіз зовнішньої поверхні доріжки тертя встановив, що цинкове покриття на всіх досліджуваних зразках зношується рівномірно, окрім покриття, яке знаходилось в розчині лимонної кислоти (рис. 5). Для останнього на доріжці тертя проявляються глибинні розшарування.

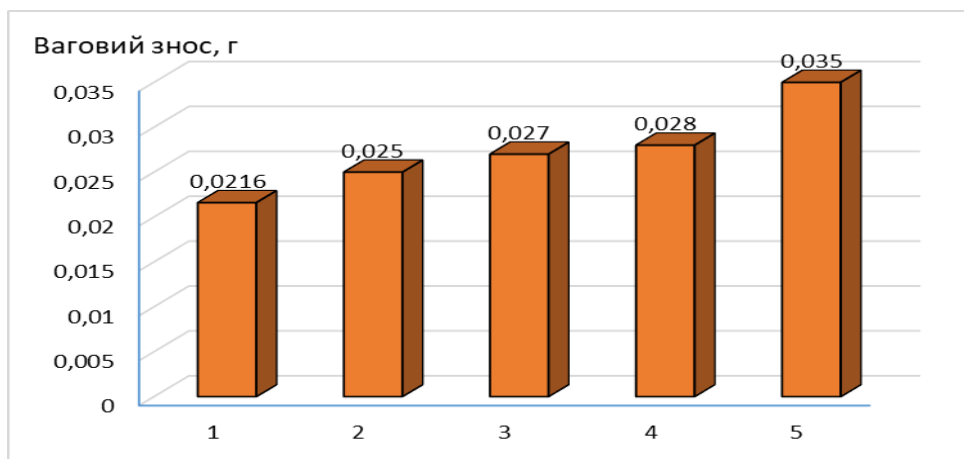


Рис. 4. Ваговий знос зразків згідно таблиці 1 в умовах впливу абразиву.

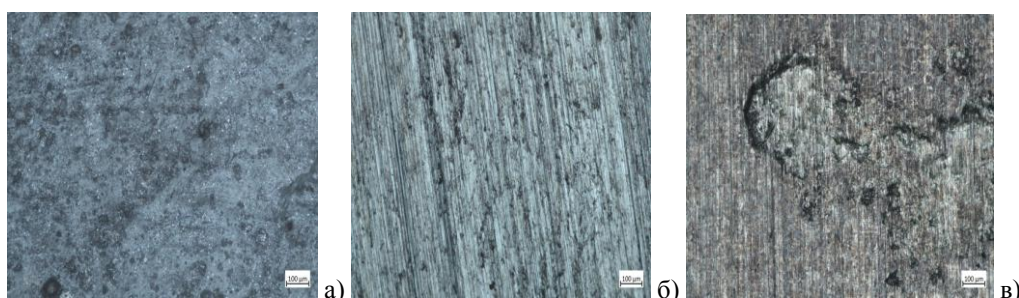


Рис. 5. Зовнішня поверхня дослідних зразків: а – вихідна поверхня сталі з цинковим покриттям, б – доріжка тертя зразку 1 після витримки в приміщенні, в – доріжка тертя зразку 5 після витримки в розчині лимонної кислоти.

При дослідженні мікротвердості на доріжці тертя встановлено, що даний параметр підвищується для всіх досліджуваних зразків, окрім зразку, який витримували в ґрунті (рис. 6). Імовірно, для цього зразку в процесі тертя відбувається руйнування сформованої окисно-карбонатної плівки, поступове її стирання абразивними частками.

Під час проведення технологічного процесу гарячого цинкування відбуваються металургійні реакції з утворенням проміжних залізо-цинкових фаз з різною кристалічною структурою [12], кожна з цих фаз сплаву характеризується певним співвідношенням, в якому цинк зв'язується із залізом, та певною твердістю сформованих шарів залізоцинкового інтерметаліду Fe-Zn.

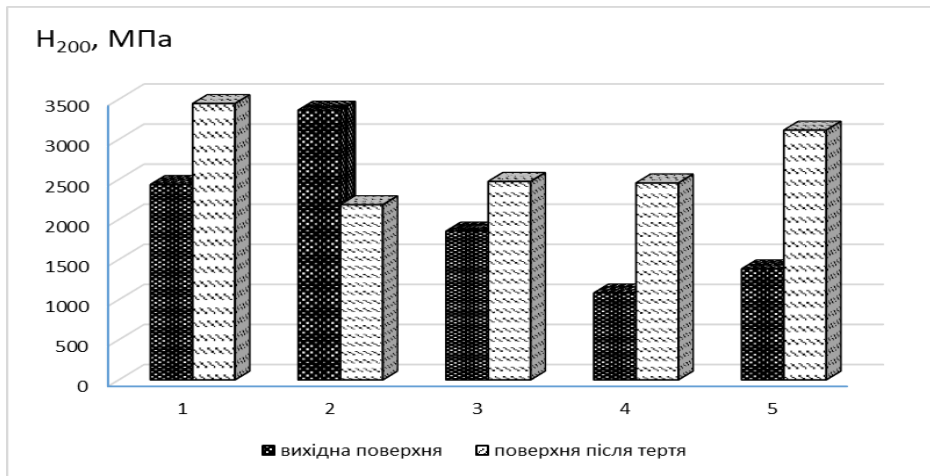


Рис. 6. Мікротвердість поверхневих шарів дослідних зразків згідно таблиці 1.

Всі інтерметалідні фази Fe-Zn характеризуються вищою твердістю, ніж основний метал та верхній шар цинку (рис. 7,а).

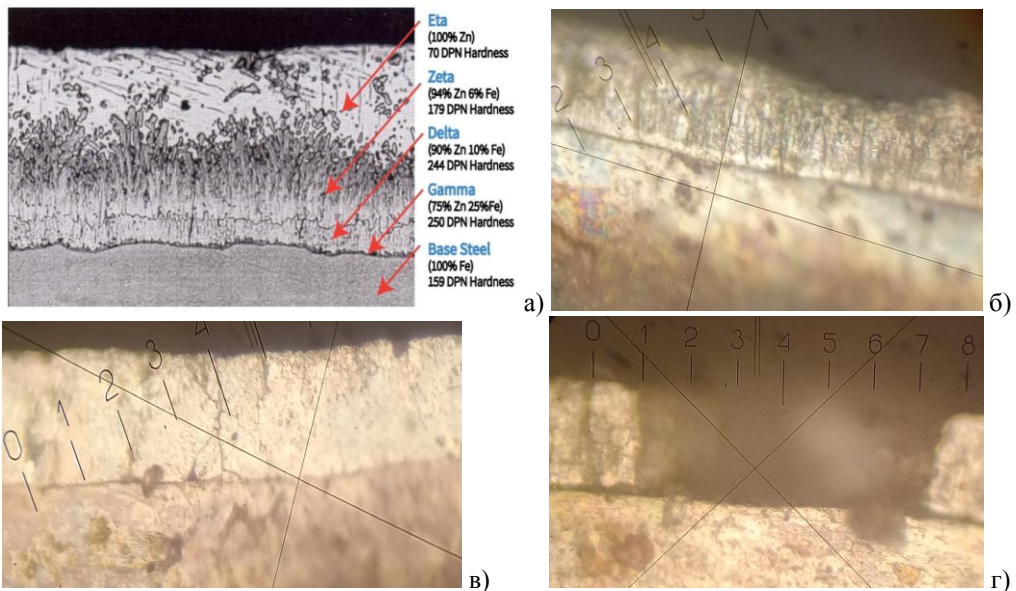


Рис. 7. Структура цинкового покриття на сталі: а – інтерметалідні фази Fe-Zn згідно [12]; фотографії мікрошліфів доріжок тертя зразків 1 після витримки в приміщенні (б), 2 після витримки в ґрунті (в), 5 після витримки в розчині лимонної кислоти (г).

Оскільки в процесі тертя відбувається поступове стирання цинкового покриття абразивними частками (рис. 7), кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів залежить від інтенсивності зношування окремих інтерметалідних фаз, що потребує подальших досліджень.

Представлені результати досліджень свідчать про комплексну оцінку корозійної та абразивної стійкості цинкового покриття за умов впливу різних чинників навколишнього середовища, що може доповнити оцінку якості сформованого цинкового покриття залежно від експлуатаційних умов.

Висновки. Представлені результати аналізу впливу чинників зовнішнього середовища на корозійну стійкість цинкового покриття, одержаного методом гарячого цинкування, свідчать про різну інтенсивність впливу рН розчину, води, солі та температури на корозійну стійкість цинкового покриття. Встановлено інтенсивний прояв корозійних процесів на цинковому покритті в кислому середовищі. Наявність солі не впливає на інтенсивність корозії, в порівнянні з впливом дистильованої води, окислювальні процеси протікають за однаковим механізмом утворення гідроксиду і оксиду цинку у вигляді білого осаду. За умов формування оксидно-карбонатної плівки в ґрунті суттєво підвищується корозійна стійкість та мікротвердість цинкового покриття. Всі досліджувані чинники навколишнього середовища знижують стійкість покриття щодо впливу абразивних часток.

Список літератури

1. Al-Sherrawi M. H., Lyashenko V., Edaan E. M., Sotnik S. Corrosion of metal construction structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2018. Vol. 9, Is. 6. P. 437–446.
2. Vontorová J., Mohyla P., Kreislová K. Quality of Zinc Coating Formed on Structural Steel by Hot-Dip Galvanizing after Surface Contamination. *Coatings*. 2024. 14. P. 493. <https://doi.org/10.3390/coatings14040493>
3. Boshkov N.S., Petrov, K.P., Kovacheva, D., Vitkova, S.D., Nemska, S. Influence of the Alloying Component on the Protective Ability of Some Zinc Galvanic Coatings. *Electrochim. Acta*. 2005. Vol. 51, Is. 1. P. 77–84 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.03.049>
4. EGGA - European General Galvanizers Association: Galvanized steel and sustainable construction - solutions for a circular economy. 2021 – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/04/EGGA-Sustainability-Construction-Online-lock.pdf> (дата звернення 06.10.2024).
5. Suliga M., Wartacz R. The influence of the angle of working part of die on the zinc coating thickness and mechanical properties of medium carbon steel wires. *Arch. Metall. Mater.* 2019. 64. P. 1295–1299. DOI 10.24425/amm.2019.130093
6. Kania H. Structure and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by the Batch Double Hot Dip Method in Eutectoid ZnAl Bath with the Addition of Mg and Si. *Coatings*. 2022. 12. 1207. <https://doi.org/10.3390/coatings12081207>
7. Горбатенко В. Біла корозія оцинкованої сталі. Причини виникнення та методи захисту. 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/bila-koroziya-ocinkovanoyi-stali/?srsltid=AfmBOooSCHDHwyo7RrtQiwAYlxaWQiB-udxBWjBg5i0jJFvtekxwS8PN> (дата звернення 17.10.2024).
8. Akamphon S., Sukkasi S., Boonyongmaneera Y. Reduction of zinc consumption with enhanced corrosion protection in hot-dip galvanized coatings: A process-based cost analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 58. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.001>
9. Pinger T., Van den Bossche N. On the influence of zinc coating and outdoor exposure on the strength of adhesive, clinched, and hybrid joints of batch hot-dip galvanized steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 118. P. 4031–4042. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08123-x>
10. ТОВ «Компанія «Метал Інвест»» – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metalinvest.ua/about-us/> (дата звернення 06.10.2024).
11. Скворцов О. О., Мікосянчик О. О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С.64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)

12. The HDG Coating. American Galvanizers Association, 2011. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/the-hdg-coating> (дата звернення 26.10.2024).

Стаття надійшла до редакції 29.10.2024.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Штейник Максим Анатолійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7976-0661>.

Мнацаканов Степан Рудольфович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», освітньо-професійна програма «Обладнання повітряних суден», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5416-2714>.

Живновицький Кирило Віталійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 272 «Авіаційний транспорт», освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 5358595@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0009-8237-4439>.

Дубовик Владислав Євгенійович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 2551625@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-4435-8465>.

O. MIKOSIANCHYK, M. SHTEINYK, S. MNATSAKANOV, K. ZHIVNOVYTSKYI, V. DUBOVYK

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE CORROSION RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF ZINC COATINGS ON STEEL

The aim of the study was to investigate the intensity of corrosion processes in zinc coatings in aggressive and non-aggressive environments and to determine the resistance of zinc coatings to free abrasive attack. The protective properties of zinc coating on metal surfaces, its service life depending on the coating thickness and operating conditions are analyzed. The features of the technological process of anticorrosive protection of metal structures by hot-dip galvanizing are presented. The intensity of corrosion processes in zinc coatings in aggressive and non-aggressive environments is investigated. Intensive destruction of the coating in citric acid solution and gradual oxidation of the coating with the formation of white rust in water and NaCl solution were found. The results of zinc coating wear in an abrasive environment are presented and the influence of external factors and abrasive on the microhardness of the coating is analyzed. The results of the abrasive wear studies in a free, non-rigidly fixed abrasive revealed an increase in weight wear by 1.16, 1.25, 1.3 and 1.62 times for samples after 30-day exposure in soil, distilled water, NaCl and citric acid solutions, respectively, compared to the wear indicators for the sample that was indoors. An increase in microhardness on the friction track was found for all samples, except for the sample exposed to soil. An increase in microhardness on the friction track was found for all samples except the sample kept in soil. It is assumed that the kinetics of changes in the microhardness of the surface layers of the friction raceway depends on the wear rate of individual intermetallic phases of the zinc coating.

Key words: friction, coating, wear, abrasive, corrosion, microhardness, testing, oxidation.

References

1. Al-Sherrawi M. H., Lyashenko V., Edaan E. M., Sotnik S. Corrosion of metal construction structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2018. Vol. 9, Is. 6. P. 437–446.
2. Vontorová J., Mohyla P., Kreislová K. Quality of Zinc Coating Formed on Structural Steel by Hot-Dip Galvanizing after Surface Contamination. *Coatings*. 2024. 14. P. 493. <https://doi.org/10.3390/coatings14040493>
3. Boshkov N.S., Petrov, K.P., Kovacheva, D., Vitkova, S.D., Nemska, S. Influence of the Alloying Component on the Protective Ability of Some Zinc Galvanic Coatings. *Electrochim. Acta*. 2005. Vol. 51, Is. 1. P. 77–84 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.03.049>
4. EGGA - European General Galvanizers Association: Galvanized steel and sustainable construction - solutions for a circular economy. 2021 – [Elektronnij recurc]. – Rezhim doctupu: <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/04/EGGA-Sustainability-Construction-Online-lock.pdf> (data swernennja 06.10.2024).
5. Suliga M., Wartacz R. The influence of the angle of working part of die on the zinc coating thickness and mechanical properties of medium carbon steel wires. *Arch. Metall. Mater.* 2019. 64. P. 1295–1299. DOI 10.24425/amm.2019.130093
6. Kania H. Structure and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by the Batch Double Hot Dip Method in Eutectoid ZnAl Bath with the Addition of Mg and Si. *Coatings*. 2022. 12. 1207. <https://doi.org/10.3390/coatings12081207>
7. Gorbatenko W. Bila korosija ozinkowanoï ctali. Pritschini winiknennja ta metodi sachictu. 2024. – [Elektronnij recurc]. – Rezhim doctupu: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/bila-koroziya-ocinkovanoyi-stali/?srsId=AfmBOooSCHDHwyo7RrtQiwAYlxaWQiB-udxBWjBg5i0jJFvtekwS8PN> (data swernennja 17.10.2024).
8. Akamphon S., Sukkasi S., Boonyongmaneera Y. Reduction of zinc consumption with enhanced corrosion protection in hot-dip galvanized coatings: A process-based cost analysis.

Resources, Conservation and Recycling. 2012. Vol. 58. P. 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.001>

9. Pinger T., Van den Bossche N. On the influence of zinc coating and outdoor exposure on the strength of adhesive, clinched, and hybrid joints of batch hot-dip galvanized steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 118. P. 4031–4042.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08123-x>

10. TOW «Kompanija «Metal Inwect»» – [Elektronnij recurc]. – Rezhim doctupu: <https://metalinvest.ua/about-us/> (data swernennja 06.10.2024).

11. Skvortsov O., Mikosianchyk O. Research of the wear resistance of electro-spark coatings under abrasive conditions. *Problems of friction and wear*. 2023. 3 (100). C.64-72.
[https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)

12. The HDG Coating. American Galvanizers Association, 2011. – [Elektronnij recurc]. – Rezhim doctupu: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/the-hdg-coating> (data swernennja 26.10.2024).

Oksana Mikosianchyk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Maksym Shteinyk – Master’s degree candidate in Higher Education, specializing in 131 "Applied Mechanics" within the educational and professional program "Applied Mechanics, Standardization, and Quality Assessment of Technical Systems", National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7976-0661>.

Stepan Mnatsakanov – Bachelor’s degree candidate in Higher Education, specializing in 134 «Aviation and rocket-space engineering», educational and professional program «Aircraft Equipment», National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 8388503@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5416-2714>.

Kyrylo Zhivnovytskyi - graduate of higher education with a master's degree in the specialty 272 "Aviation transport", educational and professional program "Maintenance and repair of aircraft and aircraft engines", National Aviation University, 1 Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 5358595@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0009-8237-4439>.

Vladyslav Dubovyk – Master’s degree candidate in Higher Education, specializing in 131 "Applied Mechanics", educational-professional program "Applied Mechanics, Standardization, and Quality Assessment of Technical Systems", National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 2551625@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-4435-8465>