

Д. В. Мірошниченко, д-р техн. наук, професор, Л. А. Лисенко, аспірант,  
С. Л. Жаров, аспірант, О. В. Квасов, аспірант, Д. К. Кузін, аспірант,  
В. В. Марченко, аспірант, С. А. Набока, аспірант

## **ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ «ГРУНТ-ЕМАЛЬ» НА ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*

**Ключові слова:** антикорозійні покриття; промислові ґрунтовки та емалі; фосфат цинку; показники якості покриття; корозійна стійкість; взаємозв'язок між складом і характеристиками.

**1. Вступ.** Корозія металевих конструкцій залишається однією з ключових проблем промисловості, що спричиняє значні економічні втрати та скорочення терміну служби обладнання. Найпоширенішими методами захисту є органічні покриття на основі ґрунтівок і емалей завдяки їх універсальності та ефективності. Їх антикорозійні властивості визначаються не лише хімічним складом, але й цілісністю плівки, адгезією та стабільністю захисних механізмів [1, 2].

Промислові ґрунт-емалеві системи забезпечують захист за рахунок бар'єрного, інгібуючого та міжфазного механізмів. Бар'єрний ефект обмежує проникнення агресивних агентів, інгібітори пригнічують електрохімічні реакції, а міжфазна стабільність запобігає підплівковій корозії. Ефективність цих механізмів залежить від складу системи, зокрема пігментів, сполучних і функціональних добавок [3].

Серед пігментів широко застосовується фосфат цинку, який сприяє утворенню захисних шарів і підвищує адгезію. Для посилення ефекту використовують органічні інгібітори та адгезійні добавки, зокрема силанові модифікатори [4, 5].

Разом із тим, існуючі дослідження часто розглядають антикорозійні властивості окремо або на основі спрощених моделей, що не враховують реальні технологічні умови. Це ускладнює встановлення чітких зв'язків між складом покриття, якістю плівки та корозійною поведінкою [6, 7].

Метою даного дослідження є систематичне вивчення впливу складових рецептури на антикорозійні властивості ґрунт-емалевих систем. Було підготовлено вісім варіантів покриттів із варіюванням вмісту фосфату цинку, органічних інгібіторів та міжфазних добавок при однакових умовах нанесення. Оцінка проводилась у єдиній експериментальній системі для встановлення взаємозв'язків між складом і властивостями.

**1.1 Огляд літератури.** Органічні ґрунт-емалеві покриття є ефективним методом захисту сталевих конструкцій завдяки поєднанню бар'єрного, інгібуючого та адгезійного механізмів [8, 9].

Бар'єрний захист базується на обмеженні проникнення вологи та кисню. Його ефективність визначається товщиною та суцільністю плівки, тоді як дефекти значно прискорюють корозію [10].

Інгібуючий ефект забезпечується антикорозійними пігментами, серед яких фосфат цинку є одним із найефективніших завдяки здатності формувати захисні фосфатні шари. Органічні інгібітори додатково блокують активні центри корозії, діючи переважно на межі розділу фаз.

Важливим фактором є адгезія покриття до металу. Її покращують за допомогою силанових добавок, які підвищують стійкість до розшарування та підплівкової корозії.

Більшість досліджень аналізує окремі механізми, що обмежує розуміння їх комбінованої дії в реальних системах. Останні роботи підкреслюють необхідність комплексного підходу, який враховує склад, структуру плівки та корозійну поведінку одночасно.

**1.2 Постановка проблеми.** Незважаючи на широке застосування ґрунт-емалевих систем, їх раціональне проектування залишається складним через взаємодію кількох захисних механізмів. Існуючі дослідження рідко встановлюють чіткі кількісні зв'язки між складом, якістю покриття та корозійною стійкістю в однакових умовах.

Відсутність системного підходу призводить до того, що покриття зі схожим складом можуть мати різні властивості. Вплив пігментів, інгібіторів і міжфазних характеристик часто недостатньо оцінених.

Метою роботи є створення експериментальної бази для оцінки антикорозійних властивостей шляхом варіювання складу при сталих технологічних умовах. Передбачено аналіз якості плівки, адгезії та корозійної стійкості з подальшим встановленням взаємозв'язків між складом і експлуатаційними характеристиками.

**2. Методологія.** Методологія дослідження спрямована на відображення хіміко-технологічного підходу до розробки та оцінки антикорозійних покриттів. Вона охоплює підготовку ґрунтів і емалей (розробку рецептури, обробку, нанесення на сталеві основи) та оцінку їх антикорозійної ефективності. Підхід поєднує етапи підготовки покриття з показниками його якості та корозійною поведінкою, а чисельне моделювання використовується як допоміжний інструмент для інтерпретації експериментальних результатів.

**2.1. Загальний методологічний підхід та межі дослідження.** Методологія базується на принципах хімічної технології антикорозійних покриттів і охоплює підготовку, нанесення та оцінку ґрунтів і емалей для захисту вуглецевої сталі. Основна мета – дослідити вплив складу та технологічної обробки на якість покриття й його антикорозійні властивості.

У роботі акцент зроблено на технологічному процесі отримання покриттів (змішування, диспергування, нанесення, затвердіння). Корозійну активність оцінюють на покритих зразках, а чисельне моделювання використовується як допоміжний інструмент. Структуру та етапи дослідження подано у вигляді блок-схеми.

**2.2. Матеріали та антикорозійні системи покриттів.** Об'єктом дослідження є промислові антикорозійні ґрунтовки та емалі, що застосовуються окремо або в системі

«ґрунтовка-емаль» для захисту сталевих конструкцій в агресивних середовищах. Для демонстрації промислової значущості експериментальної процедури на рисунку 1 представлено типовий приклад високошвидкісного диспергуючого обладнання, що використовується для введення пігменту та наповнювача під час підготовки покриття.



Рисунок 1 – Промисловий високошвидкісний диспергатор для приготування ґрунт-емалевих композицій

Для ґрунтовок обрано епоксидні системи завдяки їх високій адгезії, хімічній стійкості та здатності формувати щільні захисні плівки. Емалі на основі алкідних і акрилових сполучних використовувалися як фінішні покриття для підвищення бар'єрних властивостей і стійкості до зовнішніх впливів. Основним антикорозійним пігментом був фосфат цинку, що утворює захисні шари та пригнічує корозійні процеси.

Досліджені ґрунтовки включали двокомпонентну епоксидну систему на основі DGEBA з поліамідним затверджувачем та водну епоксидну дисперсію. Емалі створено на базі алкідних (з лаком PF-060, оксидом заліза) та акрилових систем. До окремих складів додавали органічні інгібітори корозії (бензотриазол/толїлтриазол) і силанові промотори адгезії.

**2.3. Підготовка та розробка рецептур антикорозійних покриттів.** Підготовка ґрунтів і емалей здійснювалася за контрольованою процедурою: полімерне сполучне кондиціонували при кімнатній температурі, після чого поступово вводили пігменти й наповнювачі при перемішуванні для рівномірного змочування. Диспергування проводили до отримання стабільної однорідної суспензії, що визначає бар'єрні властивості покриття. Далі додавали функціональні добавки для регулювання реології та плівко-

утворення. У двокомпонентних епоксидних системах затверджувач вводили перед нанесенням, після чого суміш витримували для стабілізації та видалення повітря.

**2.4. Варіанти покриттів та диференціація рецептур.** Було підготовлено кілька варіантів ґрунтовок і емалей, що відрізнялися складом сполучного та функцією в системі захисту. Їх характеристики наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики складів досліджуваних антикорозійних систем «ґрунт–емаль»

Варіант	Система покриття	Ґрунт сполучник	Емаль сполучник	Цинк фосфат рівень	Органічний інгібітор	Силан промотер
V1	Ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алкід	Базовий	Ні	Ні
V2	Ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алкід	Базовий	Так	Ні
V3	Ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алкід	Базовий	Ні	Так
V4	Ґрунт + емаль	Епоксид-ефір	Алкід	Базовий	Так	Так
V5	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Ні	Ні
V6	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Так	Ні
V7	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Ні	Так
V8	Ґрунт + емаль	Ероху-ester	Алкід	Підвищений	Так	Так

Таблиця 1 показує, що кожен систему «ґрунт-емаль» досліджували у двох варіантах на основі базового рецепту. Відмінності полягали у вмісті фосфату цинку та додаванні органічних інгібіторів і силанів, що розширило експеримент без зміни основної хімії.

**2.5. Нанесення ґрунтовок та емалей на сталеві підкладки.** Ґрунтовки та емалі наносили на очищену й знежирену вуглецеву сталь у контрольованих умовах. Використовували розпилення або пензель, забезпечуючи суцільні плівки без дефектів. Товщина сухої плівки становила 60–80 мкм для ґрунтів і 40–60 мкм для емалей; шари наносили послідовно після висихання попереднього. Затвердіння проходило в лабораторії: епоксидні системи зшивалися, емалі формували плівку після випаровування розчинника. Контролювали в'язкість, режими нанесення та час життєздатності сумішей.

**2.6. Оцінювання антикорозійної активності покриттів.** Антикорозійну ефективність покриттів оцінювали в умовах, наближених до промислових, за ознаками деградації: підплівковою корозією, пухирцями, відшаруванням і втратою адгезії. Порів-

нювали різні склади для виявлення тенденцій і зв'язку між якістю покриття та корозійною стійкістю, що відповідає практичним підходам.

**2.7. Модельна інтерпретація корозійних процесів.** Для пояснення експериментальних результатів використано чисельну модель, що описує транспорт агресивних речовин і дію інгібіторів у покриттях та дозволяє оцінити вплив якості плівки на корозію.

По-перше, потік агресивних речовин через шар покриття було описано за допомогою залежності, що базується на дифузії:

$$J = \frac{D_{eff} (C_{ext} - C_{int})}{L}, \quad (1)$$

де  $J$  – потік агресивних речовин через покриття (моль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>),  $D_{eff}$  – ефективний коефіцієнт дифузії агресивних речовин у покритті (м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>),  $C_{ext}$  – концентрація агресивних речовин на зовнішній поверхні покриття (моль·м<sup>-3</sup>),  $C_{int}$  – концентрація на межі розділу метал-покриття (моль·м<sup>-3</sup>),  $L$  – товщина покриття (м).

Це рівняння відображає бар'єрний ефект покриття, який в першу чергу визначається товщиною та суцільністю плівки, що залежать від умов нанесення та затвердіння.

Вплив пористості покриття та структури дефектів на масоперенесення враховувався за допомогою ефективного коефіцієнта дифузії:

$$D_{eff} = D_0 (1 - \phi)^n, \quad (2)$$

де  $D_0$  – коефіцієнт дифузії в полімерній матриці без дефектів (м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>),  $\phi$  – об'ємна пористість покриття (безрозмірна величина),  $n$  – структурний показник, що відображає зв'язність пор і дефектів.

Ця залежність встановлює прямий зв'язок між якістю дисперсії пігменту, утворенням плівки та стійкістю покриття до проникнення електроліту.

Нарешті, ефективність інгібування корозії, що забезпечується антикорозійними пігментами, була оцінена за допомогою параметра ефективності інгібування:

$$\eta_{inh} = 1 - \frac{i_{corr}}{i_{corr}^0}, \quad (3)$$

де  $\eta_{inh}$  – ефективність інгібування (безрозмірна величина),  $i_{corr}^0$  – щільність корозійного струму за відсутності інгібіторів (А·м<sup>-2</sup>),  $i_{corr}$  – щільність корозійного струму за наявності антикорозійних пігментів (А·м<sup>-2</sup>).

Параметр характеризує зниження корозійної активності завдяки пігментам.

Модель використано для інтерпретації впливу товщини, пористості та інгібіторів на корозійну стійкість покриттів.

**2.8. Узагальнення методології дослідження.** Методологія поєднує підготовку матеріалів, експериментальну оцінку та моделювання, що дозволяє встановити зв'язок між технологією, якістю покриття й антикорозійними властивостями.

### 3. Результати

Усі покриття досліджували в однакових умовах, що дало змогу порівняти вплив рецептури. Аналіз охоплює вісім систем із різним вмістом фосфату цинку, інгібіторами та силанами, з акцентом на якість плівки та її зв'язок із корозійною стійкістю.

**3.1. Огляд результатів експериментів та методики їх оцінювання.** Експерименти проводилися в однакових контрольованих умовах, тому всі відмінності між покриттями зумовлені лише їх складом. Досліджено вісім варіантів (V1–V8), що відрізнялися вмістом фосфату цинку, наявністю інгібіторів і силанів при однакових технологічних параметрах, що дозволило ізолювати вплив кожного чинника.

Оцінювали показники якості покриття (товщина, адгезія, дефекти, активність інгібіторів) і корозійну стійкість. Аналіз базувався на порівняльному підході – визначенні відносних тенденцій між варіантами. Спочатку розглядали якість плівки, далі – корозійну поведінку, а потім їх взаємозв'язок для пояснення механізмів захисту.

**3.2. Показники якості систем «грунт-емаль.** Для всіх варіантів (V1–V8) проаналізовано показники якості, що характеризують формування плівки та міжфазні властивості. Порівняння виконано за однакових умов, тому результати відображають вплив саме складу покриттів.

Таблиця 2 – Показники якості покриттів досліджуваних варіантів систем «грунт-емаль» (V1-V8)

Варіант	Товщина сухої плівки, μм	Адгезія (ISO 2409)	Щільність дефектів, бал (0-5)	Ефективність інгібітору, %
V1	85 ± 5	3	4	0
V2	88 ± 6	3	4	32
V3	90 ± 5	1	3	0
V4	92 ± 6	1	3	35
V5	112 ± 7	3	2	0
V6	115 ± 8	3	2	41
V7	118 ± 6	0	1	0
V8	120 ± 7	0	1	46

Кількісні показники (табл. 2) демонструють чіткі відмінності між варіантами покриттів. Збільшення вмісту фосфату цинку підвищує товщину сухої плівки ( $\approx 85\text{--}92$  до  $112\text{--}120$  мкм) і покращує бар'єрні властивості. Адгезія суттєво зростає при використанні силанів: від середнього рівня (клас 3) до високого (класи 1–0), що свідчить про краще зчеплення зі сталлю.

Щільність дефектів зменшується при збільшенні вмісту пігменту та модифікації силанами, що вказує на більш однорідну структуру плівки. Органічні інгібітори майже не впливають на товщину й адгезію, але підвищують ефективність захисту ( $\approx 32\text{--}46$  %). Загалом: товщина залежить від пігменту, адгезія — від міжфазної хімії, інгібування — окремий фактор.

**3.3. Показники корозійного руйнування після випробувань** Після випробувань оцінено ступінь деградації покриттів за однакових умов. Аналіз базується на вимірюваних показниках пошкодження, що відображають руйнування бар'єру та втрату адгезії; результати наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Кількісні показники корозійного руйнування систем «грунт–емаль» після випробувань (V1–V8)

Варіант	Час до появи першої видимої корозії, год.	Площа корозійного ураження, %	Довжина відшарування, мм	Адгезія після випробувань (ISO 2409)
V1	120	18	12	4
V2	170	15	11	4
V3	180	12	7	2
V4	210	10	6	2
V5	240	9	8	3
V6	290	7	7	3
V7	320	4	3	1
V8	380	2	1	1

Базова система ґрунтовка-емаль (V1) продемонструвала найраніше початок корозії, причому перші видимі продукти корозії були виявлені приблизно через 120 годин впливу, площа ураження сягала 18 %, спостерігалось значне відшарування (до 12 мм) і низька адгезія (клас 4). Це свідчить про швидке проникнення електроліту та слабкий захист.

Додавання інгібітора (V2) затримало корозію до ~170 год і зменшило її площу до 15 %, але майже не вплинуло на відшарування й адгезію. Варіанти з силанами (V3–V4) дали кращий результат: початок корозії 180–210 год, площа 10–12 %, менше відшарування (6–7 мм) і краща адгезія (клас 2).

Системи з високим вмістом цинку (V5–V8) показали найвищу стійкість: площа корозії 2–9 %, початок — 240–380 год, мінімальне відшарування (1–3 мм) і краща адгезія. Найефективнішою була V8.

**3.4. Тенденції корозійної стійкості залежно від варіацій рецептур.** Порівняльний аналіз (V1–V8) показує вплив складу – вмісту фосфату цинку, інгібіторів і силанів – на стійкість покриттів.

На рисунку 2 представлено індекс корозійної стійкості (CRI) у вигляді компактної візуалізації кількісних показників пошкодження після впливу, підсумованих у таблиці 3.

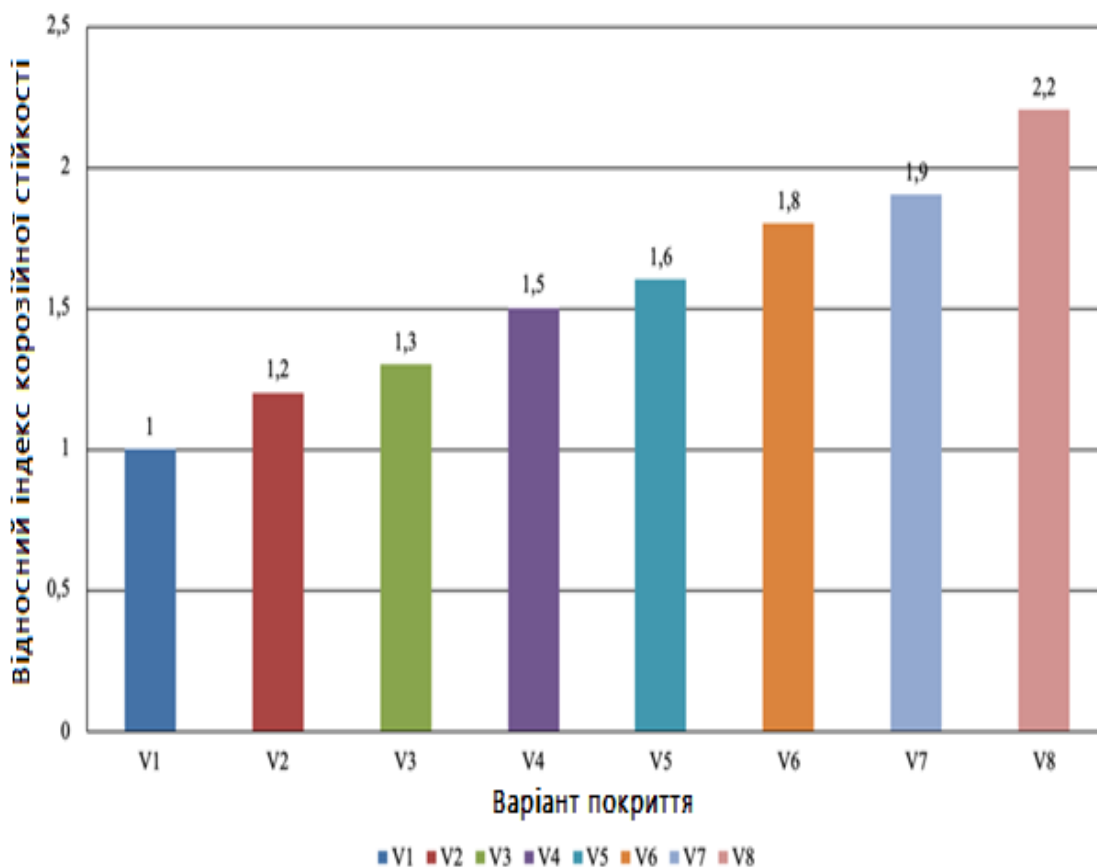


Рисунок 2 – Вплив рецептурних факторів на корозійну стійкість ґрунт-емалевих систем

На рисунку 2 показано порівняльний індекс корозійної стійкості для досліджуваних варіантів покриття (V1-V8), що підкреслює вплив вмісту фосфату цинку, додавання органічного інгібітора та посилення адгезії силану за однакових умов випробування.

Встановлено, що підвищення вмісту фосфату цинку стабільно покращує стійкість завдяки бар’єрному ефекту та пасивації, незалежно від наявності інгібіторів.

Органічні інгібітори додатково знижують швидкість і поширення корозії, пригнічуючи електрохімічні процеси. Силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, обмежуючи відшарування.

Найкращі результати досягнуті при поєднанні всіх трьох факторів (високий фосфат, інгібітори, силани), що свідчить про їх синергію. Загалом ефективність визначається комплексною дією цих чинників, а не одним параметром.

### **3.5. Узагальнення ключових результатів експериментальних досліджень.**

Антикорозійні властивості визначаються поєднанням факторів: пігменту (бар'єр), адгезії (силани) та інгібіторів. Найкращі результати досягаються їх синергією, що забезпечує щільну плівку, міцне зчеплення та ефективне пригнічення корозії.

**4. Обговорення результатів.** Результати підтверджують, що антикорозійна ефективність систем «грунт-емаль» визначається сукупною дією бар'єрних, інгібуючих і міжфазних механізмів, а не окремими параметрами складу. Зміна вмісту фосфату цинку, інгібіторів і силанів за однакових умов дозволила оцінити їхній вплив на властивості покриттів.

Фосфат цинку підвищує щільність і бар'єрність плівки, силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, а інгібітори забезпечують електрохімічне пригнічення. Водночас бар'єрні властивості самі по собі недостатні без хорошої міжфазної адгезії.

Корозійна стійкість найкраща при поєднанні всіх трьох механізмів, що підтверджує їх взаємозалежність. Кореляційний аналіз показує, що якість покриття (щільність, адгезія) є надійнішим показником, ніж склад окремо.

Літературні дані узгоджуються з результатами: фосфати впливають на мікроструктуру, силани зміцнюють міжфазний зв'язок, а інгібітори діють електрохімічно. Найвища стійкість досягається лише при їх інтеграції в єдину систему [11, 12].

У цілому показано, що оптимізація антикорозійних покриттів базується на збалансованому поєднанні бар'єрного формування, адгезії та інгібування, що забезпечує стабільну експлуатаційну ефективність.

**5. Висновки.** Досліджено антикорозійні властивості систем «грунт-емаль» за однакових технологічних умов із варіацією складу (фосфат цинку, інгібітори, адгезійні модифікатори). Встановлено чіткий зв'язок між рецептурою, якістю покриття та корозійною стійкістю.

Антикорозійний захист формується лише за рахунок поєднання кількох механізмів. Фосфат цинку підвищує бар'єрність і щільність плівки, силани покращують адгезію та зменшують підплівкову корозію, а органічні інгібітори забезпечують електрохімічне пригнічення. Найкращі результати досягаються при їх сумісній дії.

Ключовими індикаторами стійкості є щільність плівки, адгезія та активність інгібіторів, тоді як товщина має другорядне значення. Це підкреслює важливість оцінки реальних властивостей покриття, а не лише складу.

Отримані залежності можуть бути використані для оптимізації промислових систем «грунт-емаль», контролю якості та порівняльної оцінки ефективності. Подальші дослідження доцільно розширити на довготривалі та циклічні умови корозії й інші типи сполучних систем.

Література

1. Barros C., Muzeau B., L'Hostis V., François R. Impact of fluoride concentration on general corrosion of Mg-Zr alloy in a Na-geopolymer and alkaline solutions. *Corrosion Science*. 2020.
2. Xie W., Chen S., Wang S. Microstructure-dependent impact-abrasion-corrosion failure of hypoeutectic high chromium cast iron in chloride environments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025.
3. Zhang Y., Niu X., Zhou J. Surface corrosion inhibition mechanism of sarcosine as a green novel inhibitor on a novel barrier layer material of cobalt in copper film CMP for GLSI. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022.
4. Gimeno M., Puig M., Chamorro S. Improvement of the anticorrosive properties of an alkyd coating with zinc phosphate pigments assessed by NSS and ACET. *Progress in Organic Coatings*. 2016.
5. Naderi R., Attar M. The role of zinc aluminum phosphate anticorrosive pigment in Protective Performance and cathodic disbondment of epoxy coating. *Corrosion Science*. 2010.
6. Ma T., Zhang C., Li D., Chen X. Molten salt electrochemical synthesis of high-thickness and high-purity Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2026.
7. Chakraborty A., Raja C., Badhan S., Sharma P. Sustainable antifouling coating technologies for the maritime industry: An evolutionary overview. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
8. Sadia H., Jiang W., Zheng P. A novel PDMS-based coating incorporated with capsaicin and TiO<sub>2</sub>-modified CNTs: Performance and mechanisms of antifouling and anticorrosion in seawater. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
9. Hao Y., Shen Y., Song L. Anticorrosion mechanism of mesoporous polyaniline hollow nanosphere loaded with 8-HQ in an epoxy coating for aluminum alloy. *Construction and Building Materials*. 2025.
10. Du X., Zhao Z., Cheng R., Liu J. Study the factors affecting the water vapor barrier properties of organic-inorganic hybrid coatings. *Ceramics International*. 2023.
11. Zhang L., Du W., Liu H. The development of double-barrier anticorrosion coating by embedding CNTs/MXene@ZnFe-MoO<sub>4</sub> LDH in the waterborne epoxy resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2026.
12. Guo Y., Qin Z., Liu S. Interfacial engineering in low-temperature titanium-based enamel coatings: SiO<sub>2</sub>-mediated trade-offs between barrier properties and adhesion. *Ceramics International*. 2025.

Bibliography (transliterated)

1. Barros C., Muzeau B., L'Hostis V., François R. Impact of fluoride concentration on general corrosion of Mg-Zr alloy in a Na-geopolymer and alkaline solutions. *Corrosion Science*. 2020.
2. Xie W., Chen S., Wang S. Microstructure-dependent impact-abrasion-corrosion failure of hypoeutectic high chromium cast iron in chloride environments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025.

3. Zhang Y., Niu X., Zhou J. Surface corrosion inhibition mechanism of sarcosine as a green novel inhibitor on a novel barrier layer material of cobalt in copper film CMP for GLSI. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022.
4. Gimeno M., Puig M., Chamorro S. Improvement of the anticorrosive properties of an alkyd coating with zinc phosphate pigments assessed by NSS and ACET. *Progress in Organic Coatings*. 2016.
5. Naderi R., Attar M. The role of zinc aluminum phosphate anticorrosive pigment in Protective Performance and cathodic disbondment of epoxy coating. *Corrosion Science*. 2010.
6. Ma T., Zhang C., Li D., Chen X. Molten salt electrochemical synthesis of high-thickness and high-purity  $Ti_2AlC$  MAX phase coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2026.
7. Chakraborty A., Raja C., Badhan S., Sharma P. Sustainable antifouling coating technologies for the maritime industry: An evolutionary overview. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
8. Sadia H., Jiang W., Zheng P. A novel PDMS-based coating incorporated with capsaicin and  $TiO_2$ -modified CNTs: Performance and mechanisms of antifouling and anticorrosion in seawater. *Progress in Organic Coatings*. 2026.
9. Hao Y., Shen Y., Song L. Anticorrosion mechanism of mesoporous polyaniline hollow nanosphere loaded with 8-HQ in an epoxy coating for aluminum alloy. *Construction and Building Materials*. 2025.
10. Du X., Zhao Z., Cheng R., Liu J. Study the factors affecting the water vapor barrier properties of organic-inorganic hybrid coatings. *Ceramics International*. 2023.
11. Zhang L., Du W., Liu H. The development of double-barrier anticorrosion coating by embedding CNTs/MXene@ZnFe-MoO<sub>4</sub> LDH in the waterborne epoxy resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2026.
12. Guo Y., Qin Z., Liu S. Interfacial engineering in low-temperature titanium-based enamel coatings:  $SiO_2$ -mediated trade-offs between barrier properties and adhesion. *Ceramics International*. 2025.

УДК 667.633.263:620.193.2:669.14

Д. В. Мірошниченко, д-р техн. наук, професор, Л. А. Лисенко, аспірант,  
С. Л. Жаров, аспірант, О. В. Квасов, аспірант, Д. К. Кузін, аспірант,  
В. В. Марченко, аспірант, С. А. Набока, аспірант

## **ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ «ГРУНТ-ЕМАЛЬ» НА ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**

Складні взаємодії між хімічним складом, цілісністю плівки та міжфазною стабільністю визначають антикорозійні властивості промислових систем ґрунтовки-емалі. У цьому дослідженні було систематично вивчено вплив ключових змінних складу на показники якості покриття та корозійну поведінку з використанням промислових епоксидних ґрунтовок та алкідних/акрилових емалей. Особливу увагу приділено ролі вмісту фосфату цинку, органічних інгібіторів корозії та силанних адгезійних промоторів у ко-

нтрольованих технологічних умовах. Було підготовлено вісім варіантів ґрунтовки-емалі на основі ідентичних систем сполучних речовин та режимів нанесення, що відрізнялися лише параметрами складу. Усі покриття наносили на сталеві основи за стандартизованих умов підготовки поверхні, затвердіння та формування плівки. Показники якості покриття, включаючи товщину сухої плівки, адгезію до сталі, щільність плівки, схильність до дефектів та функціональну активність інгібіторів, оцінювали для характеристики цілісності плівки перед оцінкою корозії.

Проаналізовано тенденції корозійної стійкості за допомогою порівняльної моделі, яка підкреслює відносні відмінності в характеристиках між варіантами складу. Результати показують, що характеристики покриття не можна пов'язати з одним фактором. Підвищений вміст фосфату цинку в першу чергу підвищив безперервність бар'єру та щільність плівки, тоді як силан-протомори адгезії значно поліпшили міжфазне зчеплення та зменшили схильність до корозії під плівкою. Органічні інгібітори корозії незалежно сприяли пригніченню корозії, обмежуючи електрохімічну активність на межі метал-покриття без зміни морфології плівки. Найвища корозійна стійкість була виявлена у складах, що поєднували поліпшені бар'єрні властивості, сильну адгезію та функціональність активних інгібіторів, що вказує на синергетичну взаємодію між структурними та функціональними механізмами захисту.

Отримані результати встановлюють чіткий взаємозв'язок між складом і характеристиками промислових систем ґрунтовки-емалі та підкреслюють важливість збалансованого хімічного та технологічного дизайну для досягнення довготривалого антикорозійного захисту.

**Ключові слова:** антикорозійні покриття; промислові ґрунтовки та емалі; фосфат цинку; показники якості покриття; корозійна стійкість; взаємозв'язок між складом і характеристиками.

D. V. Miroshnichenko, L. A. Lysenko, S. L. Zharov, O. V. Kvasov, D. K. Kuzin,  
V. V. Marchenko, S. A. Naboka

## **CHEMICAL TECHNOLOGY AND CORROSION BEHAVIOR OF INDUSTRIAL PRIMER-ENAMEL COATING SYSTEMS ON CARBON STEEL**

Complex interactions among formulation chemistry, film integrity, and interfacial stability determine the anticorrosion performance of industrial primer-enamel coating systems. In this study, the influence of key formulation variables on coating quality indicators and corrosion behavior was systematically investigated using industrial epoxy-based primers and alkyd/acrylic enamels. Particular attention was given to the role of zinc phosphate content, organic corrosion inhibitors, and silane adhesion promoters under controlled technological conditions. Eight primer-enamel variants were prepared based on identical binder systems and application regimes, differing only in formulation parameters. All coatings were applied to steel substrates under standardized surface preparation, curing, and film formation conditions. Coating quality indicators, including dry film thickness, adhesion to steel, film compactness, defect tendency, and functional inhibitor activity, were evaluated to characterize film integrity before corrosion assessment.

Corrosion resistance trends were subsequently analyzed using a comparative framework that emphasizes relative performance differences among formulation variants. The re-

sults demonstrate that coating performance cannot be attributed to a single factor. Increased zinc phosphate content primarily enhanced barrier continuity and film compactness, while silane adhesion promoters significantly improved interfacial bonding and reduced susceptibility to underfilm corrosion. Organic corrosion inhibitors contributed independently to corrosion suppression by limiting electrochemical activity at the metal-coating interface without altering bulk film morphology. The highest corrosion resistance was observed for formulations combining enhanced barrier properties, strong adhesion, and active inhibitor functionality, indicating a synergistic interaction between structural and functional protection mechanisms.

The findings establish clear formulation-performance relationships for industrial primer-enamel systems and highlight the importance of balanced chemical and technological design for achieving durable anticorrosion protection.

**Keywords:** anticorrosion coatings; industrial primers and enamels; zinc phosphate; coating quality indicators; corrosion resistance; formulation-performance relationship.

*Отримано редколегією 19.02.2026*

*Мірошніченко Денис Вікторович (Denis Miroshnichenko), д-р техн. наук, професор, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6335-8742>;*

*Лисенко Людмила Анатоліївна (Liudmyla Lysenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-9938-8250>;*

*Жаров Сергій Леонідович (Serhii Zharov), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-0038-2802>;*

*Квасов Олександр Вікторович (Oleksandr Kvasov), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0000-2948-692X>;*

*Кузін Дмитро Костянтинович (Dmytro Kuzin), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0003-5304-5632>;*

*Марченко Віктор Васильович (Viktor Marchenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0003-5287-5415>;*

*Набока Сергій Андрійович (Serhii Naboka), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».*