

УДК 667.6
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).6](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).6)

ANTICORROSIVE EFFICIENCY OF AMIDE DERIVATIVES OF FATTY ACIDS IN ALKYD-URETHANE FILM FORMERS

АНТИКОРОЗІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ АМІДНИХ ПОХІДНИХ ЖИРНИХ КИСЛОТ У СКЛАДІ АЛКІД-УРЕТАНОВИХ ПЛІВКОУТВОРЮВАЧІВ

Vitalii Y. Kuzminskyi¹
dnipro.contact1@gmail.com
ORCID: 0009-0000-0938-6235

Konstantin Ye. Varlan¹
konstvarlan@meta.ua
ORCID: 0000-0001-7888-2777

Yuliia O. Suvorova¹
yulianasuv747@gmail.com
ORCID: 0009-0003-8764-5791

Oleg V. Chervakov¹
ochervakov@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1631-3592

Svitlana I. Bukhkalov²
bis.khr@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1389-6921

В. Ю. Кузміньський¹,
аспірант

К. Є. Варлан¹,
канд. хім. наук, доцент

Ю. О. Суворова¹,
аспірант

О. В. Черваков¹,
докт. техн. наук, професор

С. І. Бухкало²,
канд. техн. наук, професор

¹ *Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro*

² *National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv*

¹ *Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро*

² *Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

Abstract. Corrosion protection of metal structures is an important scientific and engineering problem, particularly relevant to shipbuilding, mechanical engineering, and the operation of engineering structures. Conventional corrosion inhibitors based on heavy metal compounds provide high protection efficiency; however, their use is limited due to toxicity and environmental risks. Therefore, the development of environmentally friendly anticorrosive coatings based on renewable raw materials is a promising direction. *Objective:* this study investigates the anticorrosive efficiency of amide and amidoester derivatives of sunflower oil fatty acids as functional additives for an alkyd–urethane film former AU5(AL)-52(W). *Methodology:* amide (AFA-3) and amidoester (EAFA-1–EAFA-3) modifiers were synthesized by reacting fatty acid methyl esters with amines, and their structures were confirmed by FT-IR spectroscopy. Coating compositions containing 0.5–5.0 wt.% of the additives were applied onto steel substrates and tested in a 5 wt.% aqueous NaCl solution for 7 and 21 days. Corrosion rate, protection efficiency, water absorption, gel fraction, adhesion, and impact resistance of the coatings were evaluated. The results show that the incorporation of fatty acid amide and amidoester derivatives significantly improves the corrosion resistance of alkyd–urethane coatings.

Results: the highest efficiency was achieved using the piperazine-based amide AFA-3, which provided a protection degree of 98–99 % after 7 days and 90–91 % after 21 days at concentrations of 2.0–5.0 wt.%. *Scientific novelty:* the modified coatings exhibited an increased gel fraction of up to 92–92.5 %, reduced water absorption of 1.05–1.22 %, stable adhesion (grade 1), and high impact resistance of up to 45 cm. The enhanced anticorrosive performance is attributed to a combined barrier and inhibitive mechanism involving polymer network densification and passivation of the metal surface.

Practical significance: the obtained results confirm the feasibility of using fatty acid amides derived from vegetable oils to develop environmentally friendly anticorrosive coatings suitable for atmospheric corrosion category C4 according to ISO 12944-2, with a predicted service life of up to 5 years.

Key words: alkyd–urethane coatings; fatty acid amides; amidoesters; corrosion inhibitors; anticorrosive properties; vegetable oil derivatives; environmentally friendly coatings.

Анотація. Антикорозійний захист металевих конструкцій є важливою науково-технічною задачею, актуальною для машинобудування, суднобудування та експлуатації інженерних споруд. Традиційні інгібітори корозії на основі сполук важких металів забезпечують високий рівень захисту, проте їх застосування обмежується токсичністю та екологічними ризиками. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання олеохімічних продуктів, отриманих із відновлюваної рослинної сировини. *Мета:* у роботі досліджено антикорозійну ефективність амідних та амідоестерних похідних жирних кислот соняшникової олії як функціональних добавок до алкід-уретанового плівкоутворювача AY5(AL)-52(W). *Методика:* амідні (AFA-3) та амідоестерні (EAFA-1–EAFA-3) модифікатори синтезували взаємодією метилових естерів жирних кислот з амінами; їх структуру підтверджували методом FT-IR спектроскопії. Лакофарбові композиції з вмістом добавок 0,5–5,0 мас.% наносили на сталеві зразки та випробовували у 5%-му водному розчині NaCl протягом 7 та 21 діб. Визначали швидкість корозії, ступінь захисту металу, водопоглинання, вміст гель-фракції, адгезію та міцність покриттів при ударі. Встановлено, що введення амідних і амідоестерних похідних жирних кислот істотно підвищує корозійну стійкість алкід-уретанових покриттів.

Результати: Найвищу ефективність продемонстрував піперазиновий амід AFA-3, який при концентрації 2,0–5,0 мас.% забезпечує ступінь захисту 98–99 % після 7 діб і 90–91 % після 21 доби випробувань. *Наукова новизна:* модифіковані покриття характеризуються підвищеним вмістом гель-фракції до 92–92,5 %, зниженим водопоглинанням до 1,05–1,22 %, стабільною адгезією (1 бал) та високою ударною міцністю до 45 см. Підвищення антикорозійних властивостей пояснюється поєднанням бар'єрного та інгібіторного механізмів дії амідних добавок.

Практична значимість: отримані результати підтверджують доцільність використання амідів жирних кислот рослинних олій для створення екологічно безпечних антикорозійних лакофарбових матеріалів, придатних для експлуатації в умовах атмосферної корозії категорії C4 згідно з ISO 12944-2 з прогнозованим терміном служби до 5 років.

Ключові слова: алкід-уретанові покриття; аміді жирних кислот; амідоестери; інгібітори корозії; антикорозійні властивості; похідні рослинних олій; екологічно безпечні покриття.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розвиток антикорозійних технологій завжди був складовою прогресу в усіх галузях промислового виробництва. Інновації в технологіях захисту від корозії стосуються також антикорозійних покриттів та інгібіторів корозії [1].

До недавнього часу єдиними сполуками, здатними надати фарбам і покриттям необхідного рівня антикорозійного захисту, вважали дисперсні (порошкоподібні) інгібітори корозії на основі важких металів. Отримання покриттів з антикорозійними властивостями також досягається використанням солей (фосфатів) цинку і барію, як наповнювачів у складі порошкових покриттів на основі поліефірних і епоксидних плівкоутворювачів [2]. Як компоненти, що покращують захисні властивості різних органічних покриттів, розглядають нано-добавки класу оксидів цинку, алюмінію, міді [3]. Отримання антикорозійних покриттів на основі епоксидних смол також досягається використанням комбінації сферичних мікрочастинок цинку і лусочок (пластівців) з нержавіючої сталі [4]. Результати демонструють, що часткова заміна частинок цинку на залізні пластівці покращує антикорозійні властивості епоксидних покриттів за рахунок синергетичного ефекту збільшення опору покриття та подовження тривалості катодного захисту.

Але при експлуатації захищених такими лакофарбовими покриттями об'єктів, зокрема великогабаритних металоконструкцій, виникає проблема забруднення навколишнього середовища сполуками

токсичних металів [5]. З огляду на встановлений негативний вплив токсичних металів на довкілля та здоров'я людини, поправка 29 Європейської Директиви 1999/45/ЄС сприяла заміні в лакофарбових матеріалах сполук цинку, барію, стронцію та інших важких металів на більш екологічні альтернативи [6]. В той же час, дослідження антикорозійних властивостей покриттів, що зумовлені застосуванням інгібіторів корозії на основі металів, все ще мають місце. Зокрема, в [7] наведено дані про надання антикорозійних властивостей фарбі введенням в його склад мікрочастинок природного цеоліту, попередньо модифікованого розчинами нітрату лантану (III), ацетату цинку і хлориду магнію.

Прагнення до створення екологічно чистих покриттів ініціює розвиток досліджень у напрямі заміни матеріалів з вихідних вуглеводнів та із вмістом важких металів на продукти переробки рослинної сировини [8]. Зокрема, запропоновано покриття з підвищеними гідрофобністю, зносостійкістю та бар'єрними властивостями на основі лігніну, модифікованого кремнійорганічними сполуками [9]. У якості антикорозійних добавок до полімерних покриттів використовують поліфеноли природного походження як успішну заміну традиційних токсичних інгредієнтів [10]. Для покращення антикорозійної властивостей покриттів на основі епоксидних смол запропоновано використовувати мікрокапсули на основі мигдальної олії і фосфорильованої етилцелюлози, які одночасно здатні підвищувати вогнезахисну здатність покриттів [11].

Серед досліджуваних останнім часом перспективних інгібіторів корозії для екологічних лакофарбових покриттів певне місце посідають олеохімічні продукти. Відповідно до [12], в двошаровому антикорозійному покритті один із шарів містить водо-олієрозчинний інгібітор, що є аддуктом природних жирних кислот і циклогексиламіну. З огляду на [12-15], перспективними інгібіторами корозії є аміді жирних кислот. Дослідження в галузі створення продуктів на основі відновлюваної сировини, зокрема олеохімічних продуктів, відповідає принципам стратегії сталого розвитку, поєднаних поняттям «зелена хімія».

МЕТА СТАТТІ

Метою роботи було визначення перспективності застосування амідів і амідоестерів жирних кислот рослинних олій як антикорозійних добавок в поліуретановому лаку вітчизняного виробництва АУ5(АL)-52(W).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Алкідні смоли були відкриті в середині 1920-х років. Їх широке використання для отримання ЛФМ було обумовлено численним перевагам властивостей покриттів на їх основі – задовільний рівень термічної стабільності, чудовий блиск та низька вартість. Тим не менш, поява у 50-х роках нових синтетичних полімерів, зокрема: епоксидних, акрилових та поліуретанових з більш високим рівнем хімічної стійкості, фізико-механічних та термічних властивостей, трохи послабила позиції алкідних смол в лакофарбовій промисловості. В той же час, через глобальні проблеми, пов'язані з негативним впливом синтетичних полімерів на навколишнє середовище сьогодні увага дослідників привертають дослідження зосереджені на використанні плівкоутворювачів на основі екологічно чистої «зеленої» сировини, в першу чергу рослинного походження – висихаючих та напіввисихаючих олій [16]. В роботі [17] детально описані

та обговорюються різні стратегії отримання та перспективи використання алкідних гібридів: алкід-уретанових, епоксі-алкідних та акрил-алкідних плівкоутворювачів, які з екологічної точки зору поєднують властивості біо- і синтетичних полімерів.

Метою даної роботи була оцінка можливості використання амідів жирних кислот як модифікаторів (інгібіторів корозії) у складі алкід-уретанового лаку марки АУ5(АL)-52(W) (ТОВ «Імпульс», Суми, Україна). Лак АУ5(АL)-52(W) являє собою розчин в уайт-спіриті пентафталевого алкідного лаку, модифікований ароматичними діізоціанатами, є одним із найпоширеніших смол в Україні для отримання лакофарбових складів і покриттів на його основі загального призначення (будівельні фарби та лаки [18]). Уретанова складова таких лаків дозволяє формувати покриття з високими показниками адгезії, твердості, зносостійкості, водо- та хімістійкості. Крім того лак характеризується збільшеним вмістом нелетких речовин (62 %), що дозволяє його використовувати для отримання лакофарбових матеріалів (ЛФМ) зі зниженим вмістом легколетучих органічних речовин (ЛОР).

Основні характеристики лаку АУ5(АL)-52(W) наведено у таблиці 1.

Очікується, що модифікація алкід-уретанового лаку АУ5(АL)-52(W) амідами жирних кислот дозволить створити низку ефективних антикорозійних складів з низьким вмістом ЛОС для захисту металевих поверхонь.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як модельне корозійне середовище використовували 5%-й водний розчин хлориду натрію, що імітує вплив нейтрального сольового туману відповідно до стандарту ISO 9227. Таке середовище забезпечує прискорене відтворення умов атмосферної корозії металів у присутності хлоридів, характерних для промислових і прибережних зон. Проведення випробувань

Таблиця 1. Якісні показники на алкід-уретанового лаку марки АУ5(АL)-52(W) по ТУ У 24.3-24010285-003:2007

№ п/п	Найменування показника	Вимоги у відповідності до ТУ	Фактичні показники
1	Колір за йодометричною шкалою, мг I ₂ /100 см ³ , не більш	50	30
2	Зовнішній вигляд	Прозорий, допускається незначна опалесценція	Прозорий
3	Чистота лаку	Допускається наявність одиничних механічних включень не більш 10 од.	Відповідає
4	Умовна в'язкість при температурі (20 ± 0,5) °С по візкозиметру ВЗ-246 з діаметром сопла 6 мм, с	100–200	190
5	Масова доля нелетких речовин, мас. %	57–62	61,4
6	Кислотне число, мг КОН/г, не більш	15	14
7	Твердість плівки лаку покриття за маятниковим приладом типу ТМЛ (маятник А), ум.од., не менш: через 24 год	0,20	0,38
9	Час висихання при температурі (20 ± 0,5) °С до ступеня 3, ч, не більш	6	1,5

у цьому середовищі дає змогу об'єктивно оцінити антикорозійну ефективність досліджуваних покриттів і визначити їхню придатність до тривалої експлуатації в умовах підвищеного впливу солей. Випробування здійснювали у стабільних кліматичних умовах – при температурі $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$ та відносній вологості $(60 \pm 5)\%$, що сприяло відтворенню реалістичного режиму експлуатації покриттів.

Перед дослідженнями металеві зразки (пластини розміром 50×100 мм) зачищались, а потім протравлювались в хлоридній кислоті, знежирювались і підсушувались в ексикаторі. Після цього на металеві зразки наносили склади на основі алкід-уретанового лаку марки AY5(AL)-52(W) з додаванням 1 мас.% сикативу та модифікатора на основі синтезованих амідів жирних кислот соняшникової олії: естермалеїнатних та піперазинових похідних (рис. 1) у кількості від 0,5 до 5,0 мас. %.

Покриття наносили на пластини шляхом пневматичного розпилення, загальна товщина покриття у сухому вигляді становила 60 мкм (згідно ISO 2808).

Перед випробуванням пластини з нанесеним покриттям кондиціонували протягом двох тижнів за стандартних умов згідно з ISO 3270 за $23 \pm 2^\circ\text{C}$ та відносної вологості $60 \pm 5\%$. Після чого пластини занурювали у модельне середовище, на рівні 10 мм до краю початку формування покриття на пластині. Зразки із середовищем були розташовані у камері для кліматичних досліджень, де підтримувалась постійна температура 28°C та вологість $60 \pm 5\%$. Термін випробування 7 та 21 діб. Через певний проміжок часу, відведений на випробування, кожен зразок виймали з модельного розчину, висушували за допомогою промокального паперу; перевіряли на всій випробовуваній поверхні кожного зразка наявність здуття, віспин та пошкоджень (відповідно до ISO 4628-2) або інших ознак погіршення якості покриття. Після 21 доби витримки зразків у модельному середовищі було оцінено та прогнозовано термін служби покриття з додаванням та без модифікатора в атмосферних умовах категорії C4 за класифікацією ISO 12944-2:1998 (таблиця 4).

Швидкість протікання корозійного процесу у відповідному модельному середовищі визначали за зміною маси металевих зразків після випробування. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити інтенсивність руйнування металу під впливом агресивного середовища. Розрахунок швидкості корозії V здійснювали за формулою:

$$V = \frac{\Delta m}{S \cdot t},$$

де Δm – зміна маси зразка після випробування, г; S – площа поверхні зразка, м^2 ; t – тривалість експозиції, доби (або години).

Отримане значення характеризує кількість металу, що перетворюється на продукти корозії з одиниці площі за одиницю часу, і є основним показником ефективності антикорозійного захисту досліджуваних покриттів.

Ступінь захисту (Z , %) досліджуваних покриттів визначали шляхом порівняння швидкості корозії зразків, покритих модифікованим лаком, зі швидкістю корозії непокритих контрольних зразків. Розрахунок здійснювали за формулою:

$$Z = \left(1 - \frac{V_1}{V_0}\right) \cdot 100,$$

де V_0 – швидкість корозії металу без покриття, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$; V_1 – швидкість корозії металу з нанесеним покриттям, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$.

Отримане значення ступеня захисту характеризує ефективність покриття щодо зменшення інтенсивності корозійного руйнування металу. Вищі значення показника Z свідчать про кращі бар'єрні властивості та антикорозійну ефективність плівкоутворювача.

Водопоглинання лакофарбових покриттів визначали за зміною маси зразків після занурення у воду протягом заданого часу за стандартних умов, згідно ДСТУ ISO 2812-2:2001. Метод ґрунтується на вимірюванні приросту маси покриття внаслідок поглинання води. Показник водопоглинання (W , %) розраховували за формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100,$$

де m_0 – маса зразка до занурення, г; m_1 – маса зразка після витримання у воді, г.

Отримане значення характеризує здатність покриття протидіяти проникненню води, що є важливим критерієм його бар'єрних властивостей та довговічності в експлуатації.

Визначення гель-фракції сухого покриття здійснювали згідно зі стандартом ASTM D2765, який передбачає екстракцію розчинних компонентів полімерної плівки з подальшим розрахунком нерозчинного залишку (гель-фракції), що характеризує ступінь зшивання полімерної плівки покриття.

Адгезію покриття оцінювали методом решітчастих надрізів відповідно до вимог ДСТУ ISO 2409:2019. Суть методу полягає у нанесенні на поверхню покриття сітки перехресних надрізів із подальшим видаленням відшарованих частинок за допомогою клейкої стрічки. Рівень адгезії визначали в балах (від 0 до 5) залежно від площі відшарування покриття на межі поділу з основою, де 0 балів відповідає найкращій адгезії, а 5 – повному відшаруванню плівки.

Міцність покриття при ударі визначали відповідно до вимог ДСТУ ISO 12944-9:2019. Метод полягає у нанесенні контрольованого ударного навантаження

на поверхню зразка з певної висоти за допомогою стандартного вантажу. Отримане значення критичної висоти падіння вантажу, при якій покриття не зазнає видимих пошкоджень (тріщини, відшарування чи сколів), характеризує ударну міцність та еластичність плівки.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

В ході роботи в якості добавок для підвищення антикорозійних властивостей алкід-уретанового лаку АУ5(АL)-52(W) використовували естермалеїнатні та піперазинові амід жирних кислот.

їх синтезували взаємодією відповідного аміну з метиловими естерами жирних кислот соняшникової олії за методиками, наведеними в роботі [19]. Структура синтезованих модифікаторів була підтверджена даними FT-IR спектроскопії, аналіз яких наведений в табл. 1.

Оцінка корозійної стійкості алкід-поліуретанових покриттів, модифікованих синтезованими естермалеїнатними (I-III) та піперазиновими (IV) амід жирних кислот соняшникової олії відбувалась згідно ISO 2812-2:2018. Добавки вводилися у лак в кількості 0,5 %, 1,0 %, 2,0 %, 3,0 %, 5,0 % мас. Згідно раніше проведених досліджень [18] ці добавки в діапазоні концентрацій 0,5–2,5 % мас. при введенні в алкідний лак дозволяють отримувати покриття з підвищеними

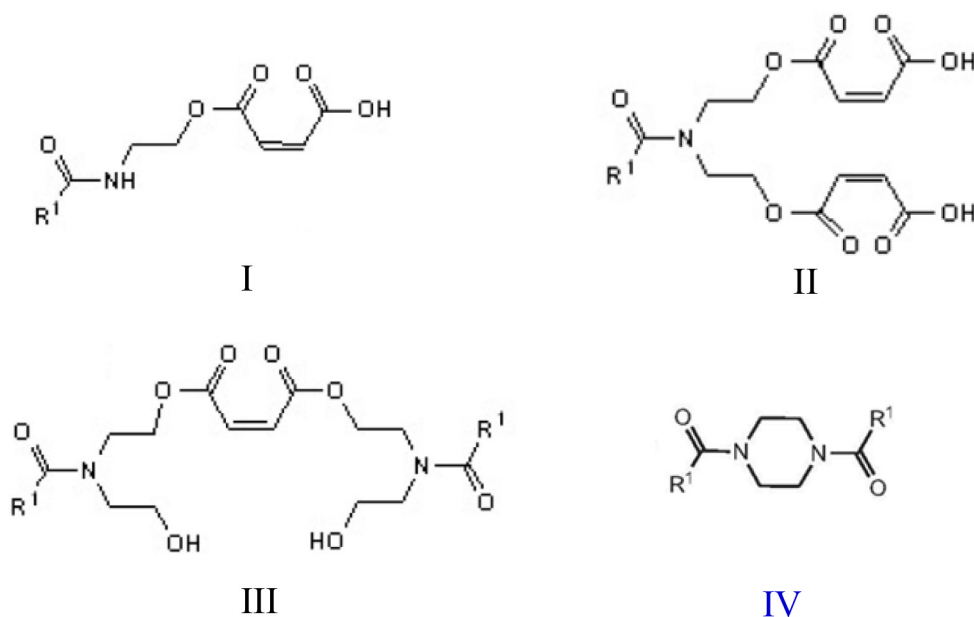


Рис. 1. Загальні структурні формули естермалеїнатних (1-3) та піперазинових амідів жирних кислот соняшникової олії

Таблиця 2. FT-IR спектри амідів жирних кислот соняшникової олії I–IV

Функціональні групи	Піки FT-IR спектру (см ⁻¹)			
	I	II	III	IV
—C(O)—OH	3500–3300 (сл.)	3367 (шир.)	—	—
C—OH	—	—	3359 (шир.)	—
NH	3500–3350 (сл.)	—	—	—
—CH ₃ (—CH ₂ —)	3009, 2924	3009, 2923	3009, 2923	3008, 2923
—CH ₂ —	2854	2853	2853	2853
—C=O	1730	1708	1709	1741
N—C(O) Амід I	1622	1620	1626	1652
C—N Амід II	1560	1570–1515	1581–1515	—
—CH ₂ —	1456	1458	1457	1457
C—N Амід III	1206	1244	1246	1300–1197
—C—O—C—	1184	1193	1172	1198
—O—C—C—	1012	1016	1068	—
коливання —CH ₂ — груп піперазинового кільця [20, 21]	—	—	—	1035
C—N Амід III	721–650 579	719–651 563	694–675 563	722 580

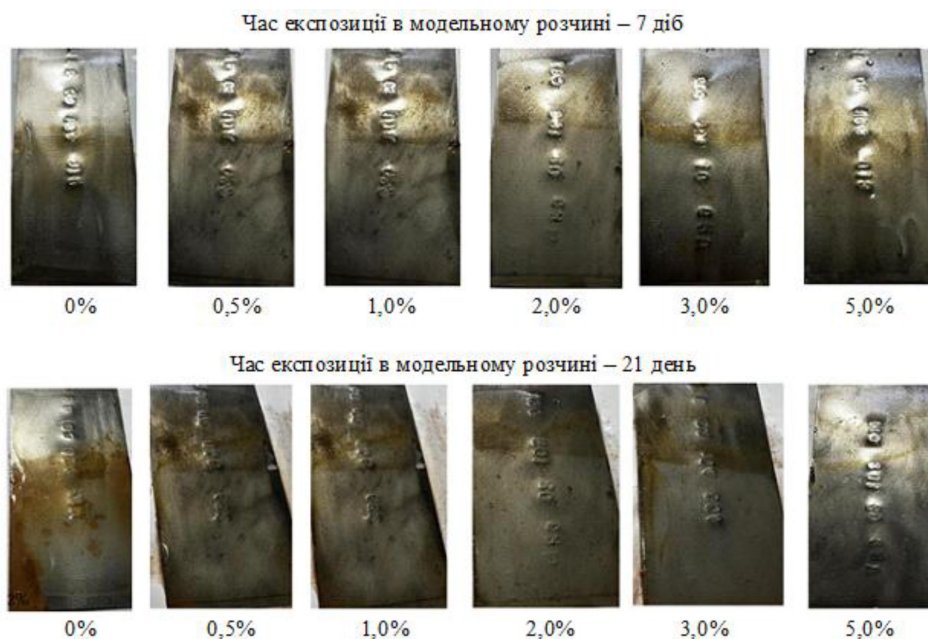


Рис. 2. Зображення пластин з нанесеними алкід-уретановими покриттями на основі лаку АУ5(АЛ)-52(В), з додаванням різної концентрації ІV модифікатора після 7 та 21 днів витримування у модельному середовищі

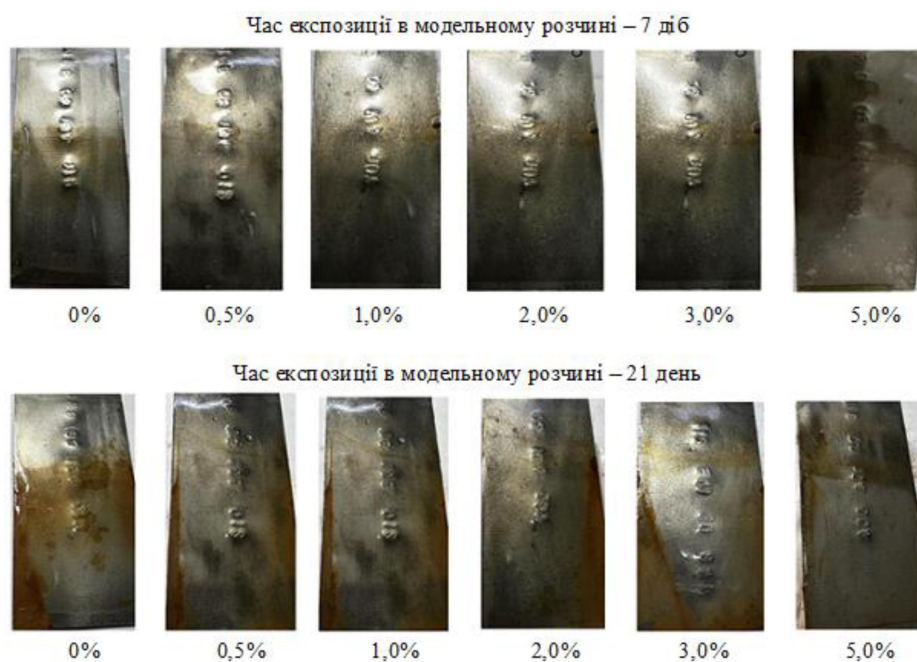


Рис. 3. Зображення пластин з нанесеними алкід-уретановими покриттями на основі лаку АУ5(АЛ)-52(В), з додаванням різної концентрації ІІ модифікатора після 7 та 21 днів витримування у модельному середовищі

фізико-механічними характеристиками. Так показник відносної твердості був межах 0,40–0,45 у.о., що на 7,5–12,5 % більше, у порівнянні з немодифікованою системою.

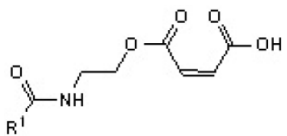
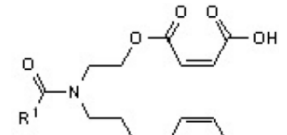
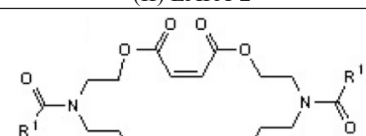
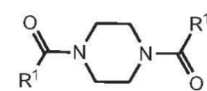
На рис. 2 та 3 наведені фото пластин з модифікованими і не модифікованими покриттями після витримки 7 та 21 день в модельному середовищі. В таблиці 2 наведені результати обробки даних зміни маси зразками та аналізу стану зовнішнього вигляду

пластин з нанесеними покриттями після витримки в модельному середовищі.

При цьому були визначені показники швидкості корозії г/см^2 та ступінь захисту покриття (%).

Отже виходячи з отриманих даних встановлено, що найкращі бар'єрні властивості корозійної стійкості алкід-поліуретанових покриттів дозволяє отримати проведення модифікації із застосуванням модифікатору АФА-3, а саме найефективніші показники

Таблиця 3. Вплив кількості модифікатора на захисні властивості покриття при витриманні у водно-сольовому розчині

Модифікатор	Кількість модифікатора, мас. %	Швидкість корозії, г/см ²		Ступінь захисту, %	
		7 діб	21 день	7 діб	21 день
 (I) EAFA-1	0,0	0,58	5,03	95	36
	0,5	1,65	5,14	93	37
	1,0	1,76	4,98	93	45
	2,0	2,65	4,52	90	55
	3,0	3,86	4,28	86	63
	5,0	4,05	3,88	80	69
 (II) EAFA-2	0,0	0,58	5,02	95	37
	0,5	0,75	3,46	96	76
	1,0	0,42	1,68	98	90
	2,0	0,21	1,47	98	90
	3,0	0,18	2,14	98	88
	5,0	0,12	4,16	99	79
 (III) EAFA-3	0,0	0,56	5,03	95	36
	0,5	0,86	5,03	96	37
	1,0	0,21	4,87	98	45
	2,0	0,14	4,66	98	52
	3,0	0,10	4,35	99	60
	5,0	0,08	4,05	99	65
 (IV) AFA-3	0,0	0,56	5,03	93	42
	0,5	1,57	2,56	93	87
	1,0	1,12	1,12	94	90
	2,0	0,65	1,81	95	90
	3,0	0,38	1,06	98	91
	5,0	0,21	1,02	98	91

досягаються при введенні модифікатора у кількості 2,0–5,0 мас.%. На рисунку 3 зображено візуальну зміну покриттів на металевих пластинах під дією сольового розчину на протязі 7 та 21 діб.

Отримані результати свідчать, що введення амідних та амідоестерних похідних жирних кислот рослинних олій до складу алкід-уретанового лаку АУ5(АL)-52(W) суттєво впливає на формування структури полімерної плівки та її захисні властивості. Найвищі антикорозійні показники (ступінь захисту до 98–99 %) спостерігаються при використанні піперазинового амиду (АFA-3) у кількості 2,0–5,0 мас.%, що зумовлено комплексом хімічних та структурних факторів.

Активність амідних модифікаторів пояснюється наявністю у їх складі функціональних груп – амідних, аміних, гідроксильних та естерних – здатних до взаємодії з карбонільними та гідроксильними групами алкід-уретанової матриці. Це сприяє утворенню додаткових водневих і донорно-акцепторних зв'язків, які підвищують ступінь зшивання плівки, формуючи більш щільну і гідрофобну структуру. Внаслідок цього зменшується проникність покриття для вологи та кисню, що призводить до зниження швидкості корозійного процесу.

Підвищення вмісту гель-фракції у модифікованих покриттях підтверджує ефективне включення амідних

добавок у просторову сітку плівкоутворювача. Цей ефект особливо виражений у випадку використання модифікатора АFA-3, який містить піперазинове кільце, здатне до утворення комплексів із катіонами металу. Така взаємодія сприяє пасивації металевої поверхні та формуванню додаткового захисного шару, що запобігає електрохімічним процесам корозії.

Результати випробувань на водопоглинання, адгезія та міцність при ударі свідчать про покращення фізико-механічних властивостей покриттів після модифікації. Зокрема, при вмісті модифікатора 3,0–5,0 мас.% водопоглинання зменшилось до 1,05–1,22 %, що відповідає класу високо водостійких покриттів (≤ 2 %). Збереження адгезії на рівні 1 балу та висока ударна міцність (45 см) підтверджують утворення еластичних і міцних плівок покриття без дефектів.

Таким чином, ефективність амідів жирних кислот у складі алкід-уретанового лаку обумовлюється подвійним механізмом дії:

1. Бар'єрним – завдяки ущільненню полімерної сітки та зниженню дифузії агресивних агентів;
2. Інгібіторним – через хемосорбційне зв'язування на поверхні металу та пасивацію активних центрів корозії.

Застосування модифікатора АFA-3 у кількості 2,0–5,0 мас.% забезпечує оптимальне співвідношення

Таблиця 4. Оцінка захисних та декоративних властивостей покриття з модифікатором, після відстоювання у водно-сольовому розчині на протязі 21 дня

Показник Тип модифікатора	Кількість модифікатора, мас. %	Час формування плівки покриття, год	Вміст тель-фракції в ксилолі, %	Водопоглинання згідно ДСТУ ISO 2812-2:2001, %	Адгезія методом решітчастих надрізів згідно ДСТУ ISO 2409:2019 бали		Міцність при ударі згідно ДСТУ ISO 12944-9:2019, см		Оцінка захисних та декоративних властивостей покриття згідно ДСТУ ISO 4628-1:2015
					до	після	до	після	
(I)	0	6	84,0	1,8	1	3	50	40	A33, АД2
	0,5	6	84,8	1,65	1	3	50	30	A33, АД2
	1,0	6	82,1	2,11	1	3	50	25	A33, АД2
	2,0	6	83,4	1,96	1	2	50	30	A32
	3,0	7	81,5	2,68	1	3	50	20	A33, АД2
	5,0	8	79,4	3,48	1	4	50	20	A33, АД2
(II) EAFA-2	0	6	84,0	1,8	1	3	50	30	A31*
	0,5	6	88,8	1,57	1	2	50	35	A31
	1,0	6	88,2	1,45	1	2	50	40	A31, АД2*
	2,0	6	87,6	1,42	1	2	50	40	A31
	3,0	7	91,7	1,34	1	3	50	30	A31, АД2*
	5,0	7,5	92,3	1,18	1	3	50	20	A31, АД2*
(III) EAFA-3	0	6	84,0	1,8	1	3	50	30	A31*
	0,5	6	82,9	2,32	1	2	50	35	A31
	1,0	7	81,5	2,58	1	2	50	40	A31, АД2*
	2,0	7	81,1	2,61	1	2	50	40	A31
	3,0	8	80,4	2,65	1	2	50	30	A31, АД2*
	5,0	8	79,6	2,68	1	2	50	40	A31, АД*
(IV) AFA-3	0	6	84,0	1,8	1	3	50	40	A31
	0,5	6	85,7	1,62	1	2	50	40	A31
	1,0	6	87,2	1,45	1	3	50	30	A33, АД2
	2,0	6	88,3	1,29	1	2	50	40	A32
	3,0	6	92,0	1,22	1	1	50	45	АД1
	5,0	6	92,5	1,05	1	1	50	45	АД1

* АЗ – захисні властивості покриттів; АД – декоративні властивості покриттів.

фізико-механічних і захисних властивостей, що дозволяє класифікувати такі покриття як придатні для експлуатації в атмосфері категорії С4 згідно з ISO 12944-2, з прогнозованим терміном служби не менше 5 років. Отримані результати підтверджують перспективність використання амідних похідних жирних кислот як екологічно безпечних функціональних добавок у технології «зелених» лакофарбових матеріалів нового покоління.

ВИСНОВКИ

Застосування амідних та амідоестерних похідних жирних кислот рослинних олій ефективно підвищують антикорозійні властивості алкід-уретанового

лаку АУ5(АL)-52(W). Найвищу ефективність забезпечує модифікація піперазиновим амідом АFA-3 у концентрації 2,0–5,0 мас.%, що дає ступінь антикорозійного захисту до 99 %. Модифікація лаку амідом сприяє формуванню більш щільної зшитої плівки з підвищеною гідрофобністю, низьким водопоглинанням (1,05–1,22 %), відмінною адгезією (1 бал) та ударною міцністю плівки покриття (до 45 см). Підвищення корозійної стійкості зумовлене комбінованою дією бар'єрного та інгібіторного механізмів. Лакофарбове покриття з модифікатором АFA-3 відповідають вимогам атмосферної категорії С4 згідно ISO 12944-2 і забезпечують захист металевих поверхонь протягом до 5 років в умовах помірного клімату.

REFERENCES

- [1] Yang, Y.-Z., Zhu, R., Wang, C.-X., Du, H.-M., & Fan, H.-J. S. (2024). Riznomanitnyi rozvytok antykoroziiynykh materialiv: ohliad [Diverse development of anticorrosion materials: A review]. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 22, no. 3, pp. 692–703. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.3.1752>
- [2] Yang, S., Huang, J., Chen, J., Noël, J. J., Barker, I., Henderson, J. D., He, P., Zhang, H., Zhang, H., & Zhu, J. (2022). Porivnialne doslidzhennia antykoroziiinoi efektyvnosti fosfatu tsynku v poroshkovykh pokryttiakh [Comparative study on anticorrosion performance of zinc phosphate in powder coatings]. *Coatings*, vol. 12, article 217. <https://doi.org/10.3390/coatings12020217>
- [3] Mirza, M. M., Rasu, E., & Desilva, A. (2016). Vplyv nano-dobavok na zakhysni pokryttia dlia naftovykh truboprovodiv Omanu [Effect of nano-additives on protective coatings for oil pipelines in Oman]. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 7, no. 4, pp. 221–225. <https://doi.org/10.18178/ijcea.2016.7.4.577>
- [4] Qi, C., Dam-Johansen, K., Weinell, C. E., Bi, H., & Wu, H. (2022). Pidvyshchennia antykoroziiynykh vlastyvostei tsynk-nasychenykh epoksydnykh pokryttiv [Enhancement of anticorrosive properties of zinc-rich epoxy coatings modified with stainless steel flakes]. *Progress in Organic Coatings*, vol. 163, article 106616. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106616>
- [5] Dohojda, M. H., Backiel-Brzozowska, B., & Dohojda, B. (2021). Zakhyst stalevykh konstruksii lakofarbovymy pokryttiamy [Protection of steel structures with paint coatings in the context of environmental pollution]. *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 31, no. 2, pp. 30–42. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0018>
- [6] Gichuhi, T. (2021). Ekolohichno bezpechni antykoroziiini dobavky [Eco-friendly anticorrosive additives for future coatings]. *Phosphates Forum of America*. Retrieved from: <https://phosphatesfacts.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-Ecofriendly-Anticorrosive-Materials-for-Paint.pdf>
- [7] Pekçioğlu, Ş. Y., & Uraz, C. (2022). Modyfikatsiia pryrodnoho tseolitu [Modification of natural zeolite for anticorrosive paint production]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, vol. 41, no. 7, pp. 2236–2246. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2021.135782.4416>
- [8] Singh, P., Rana, A., Karak, N., Kumar, I., Rana, S., & Kumar, P. (2023). Stali “rozumni” antykoroziiini pokryttia: ohliad [Sustainable smart anticorrosive coatings based on vegetable oil derivatives: A review]. *RSC Advances*, vol. 13, pp. 3910–3929. <https://doi.org/10.1039/d2ra07825b>
- [9] Wang, D., Zhao, J., Claesson, P., Zhang, F., Pan, J., & Shi, Y. (2024). Ecological synergy: anticorrosive and wear-resistant coatings based on organosolv lignin and polydimethylsiloxane [Environmental synergy: anticorrosive and wear-resistant coatings based on organosolv lignin and polydimethylsiloxane]. *Progress in Organic Coatings*, vol. 190, article 108365. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108365>
- [10] Sesia, R., Spriano, S., Sangermano, M., & Ferraris, S. (2023). Pryrodni polifenoly ta zakhyst stali vid korozii: suchasnyi stan ta perspektyvy [Natural polyphenols and steel corrosion protection: state of the art and perspectives]. *Metals*, vol. 13, article 1070. <https://doi.org/10.3390/met13061070>
- [11] Ouarga, A., Noukrati, H., Iraola-Arregui, I., Barroug, A., & Ben Youcef, H. (2020). Rozrobka antykoroziiinoho pokryttia na osnovi mikrokapsul fosforylovanoi etyltseliulozy [Development of anticorrosive coating based on microcapsules of phosphorylated ethylcellulose]. *Progress in Organic Coatings*, vol. 148, article 105885. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105885>
- [12] Trusov, V., Khodzaev, R., Shilova, O., Lezova, O., Zagrebelnyy, O., Ivanova, A., Krasilnikova, I., & Belokon, T. (2021). Binarna inhibuiucha antykoroziiina farba [Binary inhibiting anti-corrosion paint.]. *E3S Web of Conferences*, vol. 225, article 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122505006>
- [13] Elsharif, A. M., Abubshait, S. A., Abdulazeez, & Abubshait, H. A. (2020). Syntez novoho klasu inhibitoriv korozii na osnovi amidiv pryrodnykh zhyrnykh kyslot [Synthesis of a new class of corrosion inhibitors based on amides of natural fatty acids]. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13, pp. 5363–5376. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.03.015>
- [14] Al-Edan, A. K., Wan Isahak, W. N. R., Che Ramli, Z. A., Al-Azzawi, W. K., Kadhum, A. A. H., Jabbar, H. S., & Al-Amiery, A. (2023). Amidy palmitynovoi kysloty yak inhibitory korozii dlia nyzkovuhletsevoi stali v 1M HCl [Palmitic acid amides as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl]. *Heliyon*, vol. 9, article e14657. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14657>
- [15] Pyshyev, S., Romanchuk, O., Topilnytskyi, P., Romanchuk, V., Miroschnichenko, D., Rohovyi, Y., Omelianchuk, H., & Parkhomov, Y. (2025). Tvarynni zhyry ta roslynni olii yak perspektyvna syrovyna dlia inhibitoriv korozii [Animal fats and vegetable oils as promising raw materials for corrosion inhibitors]. *Resources*, vol. 14, article 30. <https://doi.org/10.3390/resources14020030>
- [16] Chervakov, O. V., Chervakov, D. O., Sukhyi, K. M., Kuzminskyi, V. Yu., Varlan, K. Ye., Belyanovskaya, E. A., Levchenko, Y. P., & Yurchik, M. S. (2024). Oleokhimichni produkty v tekhnologiyakh syntezy ekolohichno-druzhnykh polimeriv [Oleochemical products in technologies for synthesis of environmentally friendly polymers]. *Journal of Chemistry and Technologies*, vol. 32, no. 4, pp. 969–992. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.309194>
- [17] Chardon, F., Denis, M., Negrell, C., & Caillol, S. (2021). Hibrydni alkidni smoly: shlyakh do pokryttiv iz pokrashchenymy vlastyvostyamy [Hybrid alkyd resins: A path towards coatings with enhanced properties]. *Progress in Organic Coatings*, vol. 151, article 106025. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106025>
- [18] Civan Çavuşoğlu, F., & Acar, I. (2025). Vyrobnystvo farb na osnovi uretan-modifikovanykh alkidnykh smol [Paint production based on urethane-modified alkyd resins]. *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol. 13, no. 1, pp. 307–320. <https://doi.org/10.36306/konjes.1586565>

- [19] Varlan, K. Ye., Kuzminskyi, V. Yu., Chervakov, O. V., & Sverdlikovska, O. S. (2024). Amidni ta amidnoesterovi pohidni zhyrovyykh kyslot yak bahatofunktsionalni komponenty zakhysnykh alkid-uretanovykh pokryttiv [Amide and amidoester derivatives of fatty acids as multifunctional components of protective alkyl-urethane coatings]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 4, pp. 10–16. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-155-4-10-16>
- [20] Spell, H. L. (1969). Identifikatsiya piperazinovykh kilts u etylenaminakh metodom infrakrasnoyi spektroskopiyi [Identification of piperazine rings in ethyleneamines by infrared spectroscopy]. *Analytical Chemistry*, vol. 41, no. 7, pp. 902–905.
- [21] Derkaoui, S., Kherroub, D. E., & Belbachir, M. (2019). Zelene syntezuvannya: Anionna polimeryzatsiya 1,4-bis(metakryloil) piperazynu [Green synthesis: Anionic polymerization of 1,4-bis(methacryloyl)piperazine]. *Green Processing and Synthesis*, vol. 8, pp. 611–621. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0031>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yang Yu-Zhao, Zhu R., Wang C.-X., Du H.-M., Fan H.-J. S. (2024). Різноманітний розвиток антикорозійних матеріалів: огляд. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. Т. 22, № 3. С. 692–703. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.3.1752>
- [2] Yang, S., Huang, J., Chen, J., Noël, J. J., Barker, I., Henderson, J. D., He, P., Zhang, H., Zhang, H., Zhu, J. (2022). Порівняльне дослідження антикорозійної ефективності фосфату цинку в порошкових покриттях. *Coatings*. Т. 12. Стаття 217. <https://doi.org/10.3390/coatings12020217>
- [3] Mirza, M. M., Rasu, E., Desilva, A. (2016). Вплив нано-добавок на захисні покриття для нафтових трубопроводів Оману. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. Т. 7, № 4. С. 221–225. <https://doi.org/10.18178/ijcea.2016.7.4.577>
- [4] Qi, C., Dam-Johansen, K., Weinell, C. E., Bi, H., Wu, H. (2022). Підвищення антикорозійних властивостей цинк-насичених епоксидних покриттів, модифікованих лусочками нержавіючої сталі. *Progress in Organic Coatings*. Т. 163. Стаття 106616. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106616>
- [5] Dohojda, M. H., Backiel-Brzozowska, B., Dohojda, B. (2021). Захист сталевих конструкцій лакофарбовими покриттями в контексті забруднення довкілля. *Civil and Environmental Engineering Reports*. Т. 31, № 2. С. 30–42. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0018>
- [6] Gichuhi, T. (2021). Екологічно безпечні антикорозійні добавки для покриттів майбутнього. *Phosphates Forum of America*. URL: <https://phosphatesfacts.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-Ecofriendly-Anticorrosive-Materials-for-Paint.pdf>
- [7] Pekçioğlu, Ş. Ye., Uraz, C. (2022). Модифікація природного цеоліту для отримання антикорозійних фарб. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. Т. 41, № 7. С. 2236–2246. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2021.135782.4416>
- [8] Singh, P., Rana, A., Karak, N., Kumar, I., Rana, S., Kumar, P. (2023). Сталі «розумні» антикорозійні покриття на основі похідних рослинних олій: огляд. *RSC Advances*. Т. 13. С. 3910–3929. <https://doi.org/10.1039/d2ra07825b>
- [9] Wang, D., Zhao, J., Claesson, P., Zhang, F., Pan, J., Shi, Y. (2024). Екологічна синергія: антикорозійні та зносостійкі покриття на основі органосольового лігніну та полідиметилсилоксану. *Progress in Organic Coatings*. Т. 190. Стаття 108365. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108365>
- [10] Sesia, R., Spriano, S., Sangermano, M., Ferraris, S. (2023). Природні поліфеноли та захист сталі від корозії: сучасний стан і перспективи. *Metals*. Т. 13. Стаття 1070. <https://doi.org/10.3390/met13061070>
- [11] Ouarga, A., Noukrati, H., Iraola-Arregui, I., Barroug, A., Ben Youcef, H. (2020). Розробка антикорозійного покриття на основі мікрокапсул фосфорильованої етилцелюлози. *Progress in Organic Coatings*. Т. 148. Стаття 105885. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105885>
- [12] Trusov, V., Khodzhaev, R., Shilova, O., Lezova, O., Zagrebelnyy, O., Ivanova, A., Krasilnikova, I., Belokon, T. (2021). Бінарна інгібуюча антикорозійна фарба. *E3S Web of Conferences*. Т. 225. Стаття 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122505006>
- [13] Elsharif, A. M., Abubshait, S. A., Abdulazeez, Abubshait, H. A. (2020). Синтез нового класу інгібіторів корозії на основі амідів природних жирних кислот. *Arabian Journal of Chemistry*. Т. 13. С. 5363–5376. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.03.015>
- [14] Al-Edan, A. K., Wan Isahak, W. N. R., Che Ramli, Z. A., Al-Azzawi, W. K., Kadhum, A. A. H., Jabbar, H. S., Al-Amieri, A. (2023). Аміді пальмітинової кислоти як інгібітори корозії маловуглецевої сталі в 1M HCl. *Heliyon*. Т. 9. Стаття e14657. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14657>
- [15] Pyshyev, S., Romanchuk, O., Topilnitsky, P., Romanchuk, V., Miroshnichenko, D., Rohovyi, Y., Omelianchuk, H., Parkhomov, Y. (2025). Тваринні жири та рослинні олії як перспективна сировина для інгібіторів корозії. *Resources*. Т. 14. Стаття 30. <https://doi.org/10.3390/resources14020030>
- [16] Chervakov, O. V., Chervakov, D. O., Sukhyi, K. M., Kuzminskyi, V. Yu., Varlan, K. Ye., Belyanovskaya, E. A., Levchenko, Y. P., Yurchik, M. S. (2024). Олеохімічні продукти в технологіях синтезу екологічно безпечних полімерів. *Journal of Chemistry and Technologies*. Т. 32, № 4. С. 969–992. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.309194>
- [17] Chardon, F., Denis, M., Negrell, C., Caillol, S. (2021). Гібридні алкідні смоли: шлях до покриттів із підвищеними властивостями. *Progress in Organic Coatings*. Т. 151. Стаття 106025. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106025>

- [18] Civan Çavuşoğlu, F., Acar, I. (2025). Виробництво фарб на основі уретан-модифікованих алкідних смол. *Konya Journal of Engineering Sciences*. Т. 13, № 1. С. 307–320. <https://doi.org/10.36306/konjes.1586565>
- [19] Варлан, К. Є., Кузмінський, В. Ю., Черваков, О. В., Свердліковська, О. С. (2024). Амідні та амідоестерні похідні жирних кислот як багатофункціональні компоненти захисних алкід-уретанових покриттів. *Питання хімії та хімічної технології*. № 4. С. 10–16. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-155-4-10-16>
- [20] Spell, H. L. (1969). Визначення піперазинових кілець в етиленамінах методом ІЧ-спектроскопії. *Analytical Chemistry*. Т. 41, № 7. С. 902–905.
- [21] Derkaoui, S., Kherroub, D. E., Belbachir, M. (2019). «Зелений» синтез: аніонна полімеризація 1,4-біс(метакрилоїл) піперазину. *Green Processing and Synthesis*. Т. 8. С. 611–621. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0031>

© В. Ю. Кузмінський, К. Є. Варлан, Ю. О. Суворова, О. В. Черваков, С. І. Бухкало

Дата надходження статті до редакції: 12.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 01.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0