

**В. М. Павленко<sup>1</sup>**  
**В. П. Кужель<sup>2</sup>**  
**С. В. Семенченко<sup>3</sup>**  
**О. В. Корнєв<sup>3</sup>**  
**П. В. Черненко<sup>3</sup>**

## **НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТЯХ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЇ, ПЕРСПЕКТИВИ**

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>3</sup>Національна академія Національної гвардії України

*Наукова робота спрямована на дослідження екологічно безпечних полімерних покриттів у сфері автомобільної індустрії, що постійно привертає увагу вчених та практиків. У статті аналізується сучасний стан технологій у цій галузі, розглядаються найновіші дослідження та технологічні розробки, а також обговорюються їхні перспективи впровадження у виробництво. Починаючи з огляду новітніх досліджень лакофарбових матеріалів, виконується розгляд самовідновлювальних матеріалів та мікрокапсул, які мають потенціал для створення стійких та довговічних покриттів.*

*Також у роботі розглядаються антикорозійні покриття, які є важливою складовою частиною захисту автомобільних конструкцій від впливу негативних факторів навколишнього середовища. Окрему увагу приділено розробкам екологічно чистих полімерних покриттів, що відповідають вимогам сталого розвитку та дозволяють зменшити екологічний вплив промисловості на довкілля.*

*Крім того, проведено аналіз новітніх тенденцій у галузі, що дає змогу прогнозувати подальші напрями розвитку технологій та впровадження інноваційних рішень. Робота має важливе практичне застосування в автомобільній промисловості, сприяючи підвищенню якості захисту автомобільних покриттів від корозії та подовженню їх терміну служби в різних умовах експлуатації. Робота спрямована на висвітлення актуальних аспектів досліджень у сфері екологічно безпечних полімерних покриттів і надає цінний внесок у розвиток цієї важливої галузі промисловості. А отримані результати дають змогу покращити якість та тривалість захисту лакофарбового покриття, металевих конструкцій та інших виробів від корозії.*

*Застосування новітніх матеріалів та технологій у виготовленні покриттів обумовлено потребою в їх екологічності, ефективності та тривалості. Однак впровадження деяких нових технологій натрапляє на обмеження, зокрема пов'язані з їхньою економічною доцільністю та можливостями масштабування. Саме тому необхідно провести подальші дослідження з метою оптимізації технологій та матеріалів для досягнення більшої ефективності використання на автомобільному транспорті.*

**Ключові слова:** автомобіль, дослідження, корозія, лакофарбове покриття, екологічна безпека, антикорозійні покриття, фарба.

### **Постановка проблеми**

Лакофарбові матеріали в автомобільній індустрії мають одне з основних значень – вони використовуються для зовнішнього вигляду та захисту автомобілів з метою продовження терміну їх служби. Протягом останніх десятиліть відбулися значні зміни в розробці цих матеріалів, що зумовило новаторські підходи до використання і вдосконалення лакофарбових покриттів в автомобільній сфері.

Лакофарбове покриття – це тонкий шар лаку та фарби, який забезпечує захист автомобіля від різних шкідливих факторів, та зберігає його естетичний вигляд протягом тривалого часу. Воно служить бар'єром, що запобігає руйнуванню та деградації, що може виникнути внаслідок впливу навколишнього середовища і зовнішніх факторів [1]. Лакофарбове покриття допомагає у захисті кузовної частини від корозії, оскільки металеві компоненти схильні до ржавіння внаслідок впливу вологи та агресивних хімічних речовин.

Лак та фарба створюють бар'єр, який захищає метал від цих шкідливих впливів. Також, лакофарбове покриття забезпечує захист від ультрафіолетового випромінювання, яке може призвести до вицвітання та пошкодження фарби та інших матеріалів. Лаковий верхній шар абсорбує УФ-промені, забезпечуючи довговічність та збереження яскравості кольорів автомобіля, надаючи автомобілю блискучий та привабливий вигляд. Ця естетична складова важлива для власників автомобілів, оскільки вона впливає на перше враження від транспортного засобу. Додатково лакофарбове покриття допомагає захистити

автомобіль від подряпин та інших механічних пошкоджень, підвищуючи тривалість служби автомобіля.

Щорічно відбувається значний прогрес у вдосконаленні цих матеріалів, з метою підвищення їхньої тривалості, ефективності і стійкості до навколишнього середовища. Розглянемо новітні дослідження та розробки лакофарбових матеріалів, які досліджуються і вдосконалюються для автомобільного використання.

### Основна частина

Однією з інноваційних галузей є розробка самовідновлювальних лакофарбових матеріалів. Ці покриття мають здатність відновлювати свою структуру після подряпин, маленьких дефектів або механічних пошкоджень. Самовідновлювальні покриття поділяють на два типи: фізичні, які містять процеси дифузії та рандомізації, та хімічні, пов'язані з хімічними реакціями та полімеризацією.

Фізичне самовідновлення часто базується на використанні полімерів. Згідно з п'ятиступеневою теорією 1981 року процес містить такі етапи: перегрупування поверхні, зближення, змочування, дифузія та рандомізація [2]. Основну роль у відновленні покриття відіграє дифузія полімерних ланцюгів. Одне дослідження використовувало подвійно зшиту гідрогелеву систему для вивчення цього процесу, відзначаючи дифузію полімеру зі швидкістю від 0,51 до 0,04 мкм/с (рис. 1).

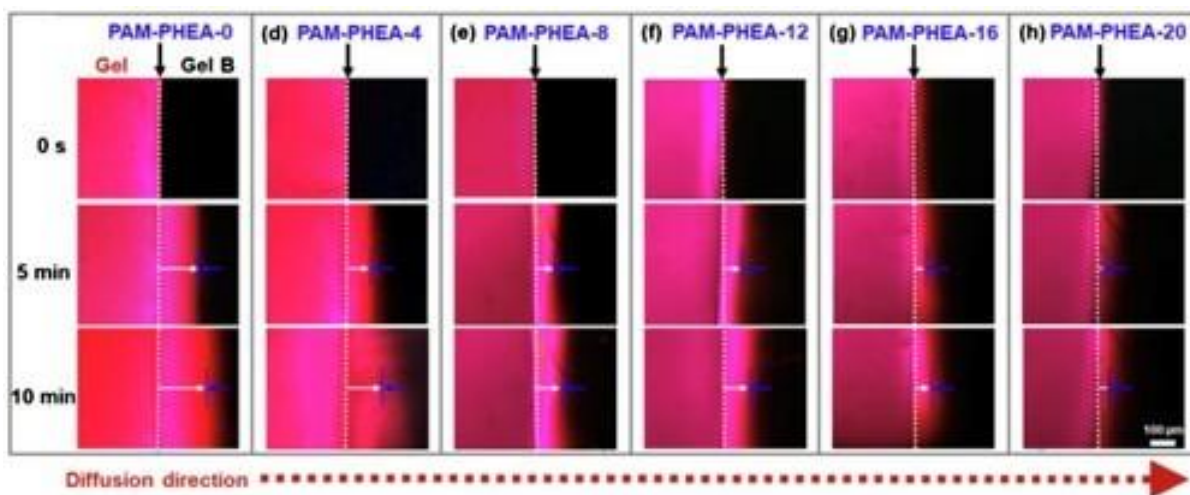


Рис. 1. Флуоресцентна мікроскопія поверхні розділу між двома гідрогелями після повторного з'єднання протягом 0 с, 5 хв і 10 хв відповідно. Масштабна шкала: 100 мкм

Інше дослідження демонструє, що поліфеніленметилен, як антикорозійне покриття для алюмінію та інших металів, виявляє самовідновлення через фізичне відновлення, коли полімер стає текучим під впливом тепла, що сприяє загоєнню [2].

Хімічне самовідновлення може бути внутрішнім, коли відновлення відбувається завдяки оборотним хімічним зв'язкам у полімері, або зовнішнім, де використовуються спеціальні лікувальні речовини.

Внутрішній метод відновлює покриття після пошкодження за допомогою зовнішніх подразників, наприклад, тепла чи УФ-світла. Зовнішнє самовідновлення передбачає інкапсуляцію лікувальних агентів у мікро- або наноконтейнери, які розбиваються при пошкодженні, звільняючи хімічні речовини для загоєння. Інтеграція капсул у полімерні системи потребує врахування таких параметрів, як розчинність, реакційна здатність, в'язкість і летючість, а також визначення рівня самовідновлення та збереження властивостей матеріалу. Мікрокапсули, зроблені з уреа-формальдегідних смол та поліуретану, добре витримують умови обробки в термореактивних смолах та композитних матеріалах [3]. Дослідження також проводилися щодо інкапсуляції підсилених агентів у порожнистих волокнах, які виконують подвійну функцію: самовідновлення та зміцнення межі поверхні, часто використовуючи методи електропрядіння для їх виготовлення.

Дослідники вивчають різні механізми, включно з використанням мікрокапсул, які вивільняють ремонтний матеріал після пошкодження [3]. Мікрокапсули – це маленькі частинки, що містять ремонтний матеріал і можуть використовуватися для автоматичного відновлення пошкодженого покриття (рис. 2).

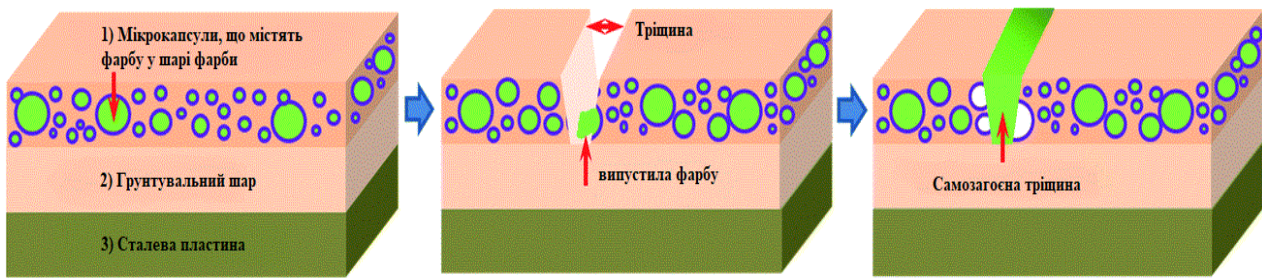


Рис. 2. Відновлення покриття за участю мікрокапсул

Мікрокапсули можуть бути вбудовані в лакофарбові матеріали, що застосовуються на поверхні автомобіля. Коли покриття стає пошкодженим, мікрокапсули ламаються, вивільнюючи ремонтний матеріал, який автоматично заповнює подряпини або тріщини, відновлюючи цілісність покриття. Ця технологія може збільшити тривалість служби покриття та покращити його зовнішній вигляд, зменшуючи необхідність у ручному ремонті.

Термін «корозія» стосується хімічного розпаду металу під впливом на нього навколишнього середовища. Реакції найчастіше є гетерогенними редокс-реакціями і відбуваються на межі між металом і середовищем. Анодна реакція зазвичай полягає в окисненні металу; катодна реакція – відновлення неметалу, зазвичай кисню. Якщо продукт окислення металу утворює щільну і стійку плівку, то процес корозії може бути самообмеженим. Якщо продукти корозійної реакції розчинні в корозійному середовищі або проникли до нього, то корозія металу може продовжуватися. Корозію зазвичай представляють у вигляді простої електрохімічної моделі.

Для автомобілів, які експлуатуються в агресивних кліматичних умовах або на дорогах, оброблених різними хімічними речовинами, важливо мати ефективні антикорозійні покриття. Дослідження у цій сфері спрямовані на розробку ефективних антикорозійних розчинів та покриттів, які можуть захистити металеві частини автомобіля від впливу агресивних середовищ, наприклад таких, як солоні дорожні розсіпки або вологість.

Зазвичай антикорозійні покриття в автомобільній промисловості класифікують відповідно до механізмів, які використовуються для захисту металу від корозії. Кожен вид корозії може відрізнитися залежно від системи, навколишнього середовища, дизайну матеріалів, техніки та інших факторів. У випадку автомобільних застосувань захисне покриття зазвичай складається з кількох шарів, де ґрунтівка прямо контактує з металом, проміжні шари розташовані між ними, а верхній шар взаємодіє із зовнішнім середовищем. Існують три основні захисні механізми антикорозійних покриттів:

1. Бар'єрні або непроникні покриття. Ці покриття блокують транспортування агресивних речовин, як-от вода, гази (наприклад,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  у промисловому середовищі), іони ( $\text{Cl}^-$  – у морському середовищі) або електрони. Для досягнення цього вони використовують шар хімічного перетворення або додають пігменти до покриття. Цей тип покриття може використовуватися як ґрунтовка, проміжний або верхній шар і часто наноситься на металеві частини автомобілів.

2. Інгібіторні покриття. На відміну від непроникних покриттів, інгібіторні покриття запобігають корозії, реагуючи з навколишнім середовищем і створюючи захисну плівку або бар'єр на металевій поверхні. Ці покриття здебільшого використовуються як ґрунтівка, оскільки вони ефективні лише в тому випадку, коли розчинені компоненти можуть реагувати з металом. Їх широко використовують в автомобільній промисловості, де висока ефективність в умовах підвищеного ризику атмосферної корозії.

3. Анодні (жертвні) покриття. Ці покриття базуються на принципі гальванічної корозії для захисту металів від корозії. Покриття містить метал або сплав, який електрохімічно активніший, ніж сама підкладка. Анодні покриття, як-от ті, які використовують порошок металевого цинку, широко застосовуються в автомобільній промисловості для захисту від корозії сталевих деталей. Оскільки ці покриття вимагають електричного контакту між основою та анодом, вони застосовуються переважно як ґрунтівка.

Металеві покриття мають бути імунними до впливу корозійних агентів. Проте, якщо на поверхні металевого покриття є дефекти, зокрема пори, подряпини або вм'ятини, корозійний процес буде визначатися електрохімічними властивостями обох металів. Щодо сталі цинкове покриття виступає як анод, а мідне – як катод. Це означає, що спочатку корозія починає руйнувати цинкове покриття. Цинк виступає як захисний «протектор» для заліза або сталі, і чим товщий шар цинку, тим надовше він відкладає руйнівну дію. З іншого боку мідь виступає катодним покриттям щодо заліза, оскільки вона

має більший позитивний потенціал. Тому залізо буде більш схильним до корозійного руйнування, особливо у сферах, де мідне покриття є пористим (рис. 3).

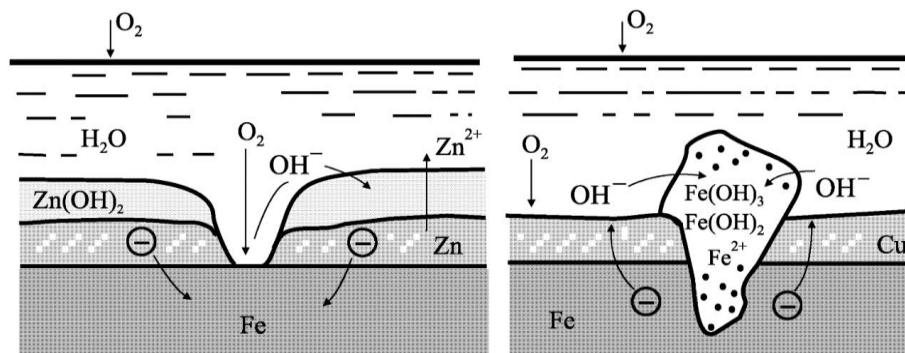


Рис. 3. Схема, що пояснює дію анодних (а) та катодних (б) процесів щодо основного металу

У природній корозії часто відбувається розділення місць анодної та катодної корозійних реакцій, і в таких випадках анодні місця схильні ставати кислими, а катодні – лужними. Зміни в рН можуть бути значними і мати серйозні наслідки для функціонування полімерних матеріалів.

Корозія заліза є одним із найпоширеніших і технологічно важливих прикладів металевої корозії. У присутності води та кисню корозія заліза перебігає до утворення складної суміші гідратованих оксидів заліза та пов'язаних сполук. Залізо є базовим металом, який піддається корозії у водних розчинах. У присутності окислюючих речовин поверхні заліза можуть пасивуватися шляхом утворення оксидного шару; якщо утворений оксидний шар є неповним, то може виникати швидка корозія [4, 5]. У найпростішому вигляді реакцію заліза з киснем для утворення оксиду заліза можна записати так (1):



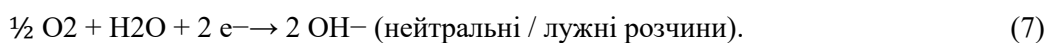
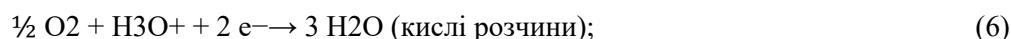
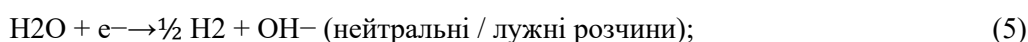
Перший крок у процесі корозії – це розчинення заліза з утворенням ферозних іонів (2.2):



Загалом рН зменшується на місцях анодного розчинення через гідроліз таких реакцій, як (3):



Найчастіше спостерігаються катодні реакції – виділення водню та відновлення кисню; виділення водню кінетично підтримується в кислих середовищах, водночас відновлення кисню кінетично підтримується в нейтральних і лужних середовищах (4–7).



Показник рН на катодних місцях зазвичай збільшується через вироблення гідроксидного іону та/або використання іону водню.

Дослідники намагаються створити нові сплави, покриття та плівки, які мають високу стійкість до корозії і можуть захищати металеві поверхні від ушкоджень. Розробляють нові лакофарбові матеріали, які є більш стійкими до корозії та зносу. Проводять різні тестування, щоб визначити, наскільки ефективними є антикорозійні матеріали в умовах реальної експлуатації автомобілів. І також звертають увагу на екологічну прийнятність антикорозійних матеріалів, шукаючи способи зменшення впливу виробництва та використання цих матеріалів на навколишнє середовище.

Зв'язуюча речовина може вважатися найважливішим компонентом антикорозійного покриття. Фактично, зовнішній вигляд та антикорозійні властивості сухого органічного покриття залежать від хімічного складу та механізму затвердіння зв'язуючої речовини. Тому в цьому огляді системи покриттів будуть поділені на чотири основні категорії на основі типу смоли:

- епоксидна;
- поліефірна;
- поліуретанова;
- акрилова.

1. Епоксидні смоли. В автомобільній промисловості епоксидні смоли використовуються для створення високоєфективних покриттів через їх високу хімічну стабільність, термостійкість, водостійкість і відмінну адгезію до металів. Вони синтезуються через реакцію конденсації між похідними дифенілпропану та епіхлоргідрином у присутності базового каталізатора [6]. Для виробництва розчинних епоксидних смол зазвичай використовують бісфенол А, який можна замінити гліцеролом або іншими аліфатичними поліолами. Існує кілька способів синтезу, що призводять до виробництва різних типів епоксидних смол, включно з циклоаліфатичними, трифункціональними, чотирифункціональними, смолами із вмістом F, P, Si, а також недавно розробленими біобазованими смолами. Вибір типу смол і системи затвердіння для покриття визначається кінцевим застосуванням епоксидної смоли.

Молекулярна вага епоксидної смоли визначає широкий спектр властивостей покриття, таких як в'язкість, гнучкість, твердість, стійкість до розчинників, адгезія та змочування підкладки. Епоксидні смоли з вищою молекулярною вагою містять багато вільних гідроксильних груп, які можуть вступати в реакції міжмолекулярного зшивання з кислотами та ізоціанатами або естерифікуватися з жирними кислотами [6]. Традиційно система затвердіння базується на амінах, поліамінах, амідах, ангідридах за допомогою катіонної полімеризації, а також шляхом нагрівання або фотоірадіації.

Виробництво біобазованих епоксидних смол, які виготовляються з рослинних олій, як-от соєва олія (ESO) і касторова олія (ECO), що містять ненасичені групи і можуть легко окислюватися або епоксидуватися, викликає зацікавленість у дослідників [7]. Технологія водорозчинних епоксидних покриттів, заснована на рідких епоксидних смолах або на твердій дисперсії епоксиду (компонент 2к), має низький вміст органічних розчинників і відмінну адгезію з проміжним шаром і підкладками. Серед інших підходів – застосування цинк-багатих епоксидних покриттів для захисту металевих підкладок у високоагресивних умовах, як-от морська атмосфера, є ефективним. Реактивність цинку з водою контролюється за допомогою капсуляції з використанням високо реактивних аміно-базованих гідрофобних полімерів.

Також існує альтернатива для зниження емісії органічних розчинників, що полягає у збільшенні вмісту твердих частинок у розчинних системах або у максимальному скороченні вмісту розчинників без втрати властивостей плівки. Одна зі стратегій – використання розчинників, що не містять небезпечних повітряних забруднювачів, та реактивних розріджувачів, які зменшують в'язкість і сприяють зшиванню, будучи частиною укомплектованої мережі. Що стосується ультрафіолетових лаків для захисту від корозії, то їх розробка продовжується, особливо з урахуванням переваг катіонного фотоіндукованого процесу порівняно з радикальним методом, включно з недоліками інгібування киснем, меншою усадкою, а також хорошими механічними властивостями та адгезією до різних підкладок.

2. Полієфіри. У сфері автомобільної промисловості базові поліестери модифікуються різними методами для отримання структур смол. Особливо значними є гіперрозгалужені / дендритні полімери на основі поліестерів, важливі завдяки своїм надзвичайним властивостям як перспективні смоли для розвитку покриттів з низьким вмістом легких органічних сполук (VOC) та захисту від сильно корозійних середовищ [8]. Модифікація гіперрозгалуженого гідроксифункціонального поліестеру в термореактивну структуру смоли здійснюється через каналізовану естерифікацію гідроксильних кінцевих груп із хлоридами кислот або придатними ангідридами. Залежно від типу кінцевих груп, структури та джерела жирних кислот або тригліцеридної олії можна отримати різні смоли. Деякі біобазовані мономерні пропонуються для заміни невідновлюваних частин дикарбонових кислот. Була розроблена алкідна смола на основі олії SachaInchi [9]. Результати показали, що додавання пентеритриту та олії SachaInchi сприяє підвищенню антикорозійної поведінки та виняткових адгезійних властивостей у суворих умовах.

Застосування та процес затвердіння можуть викликати викиди токсичних VOC із розчинних покриттів. Це призвело до поступового переходу від розчинних покриттів до водорозчинних, що мінімізує вміст VOC. Інші рішення містять ультрафіолетові покриття з ефектом затвердіння та покриття з високим вмістом твердих речовин. Алкідні смоли на основі гліколізованих відходів та різних аліфатичних гіперрозгалужених поліестерів із жирною кислотою розроблені для виробництва покриттів з низьким вмістом VOC [10].

3. Поліуретанові. Поліуретанові покриття, які є органічними полімерами, створюються хімічною реакцією моногліцериду з поліолом та діізоціанатом, утворюючи уретанову олію або уретановий алкід. Покриття на основі поліуретану (PU) мають кращі антикорозійні властивості порівняно зі звичайними алкідними смолами, однак їх синтез заснований на нафтових похідних. Розробка водорозчинного PU є першим кроком до створення покриттів без летких розчинників, безпечних та нешкідливих для

довкілля. Водорозчинні PU мають відмінні фізичні та механічні властивості й антикорозійну поведінку. Розробка більш екологічних хімічних шляхів для заміни нафтових матеріалів на основі діолів і дізоціанатів є викликом. Саме тому вивчаються рослинні олії та жири для синтезу полімерів з відновлюваних природних ресурсів [11]. Вони містять естери та подвійні зв'язки вуглецю, які можуть функціоналізуватися для виробництва поліолу. Останні дослідження зосереджені на розробці покриттів з поліефірного поліолу та поліестерногополіолу, як сировини, та водорозчинного ізоціанату як затверджувача.

Іншою стійкою сировиною для поліуретанових покриттів є поліоли на основі соєвої олії. Науковці [12] досліджували цю сировину у поєднанні з силаном, оксидом етилену та функціоналізацією фтором. Водонепроникна природа покриття на основі силан-поліолу PU сприяє характерній антикорозійній поведінці остаточного покриття. Одним із найбільш перспективних напрямів є поліадицид іамінів із дициклокарбонатами, що призводить до нон-ізоціанатних поліуретанів (NIPU).

Інша стратегія, яку використовують дослідники, – це введення нанонаповнювачів із вуглецю для покращення бар'єрних властивостей захисних покриттів, у такий спосіб підвищуючи їх антикорозійні властивості. Також вони зосередили своє дослідження на виготовленні добре диспергованих вуглецевих підсилених водорозчинних PU композитних покриттів, підкреслюючи критичні фактори, що впливають на бар'єрні властивості, як схематично зображено на рисунку 3. Відмінна антикорозійна поведінка вуглецевих підсилених PU покриттів може бути обумовлена їх здатністю формувати мережу в матриці PU, що перешкоджає проникненню сторонніх молекул.

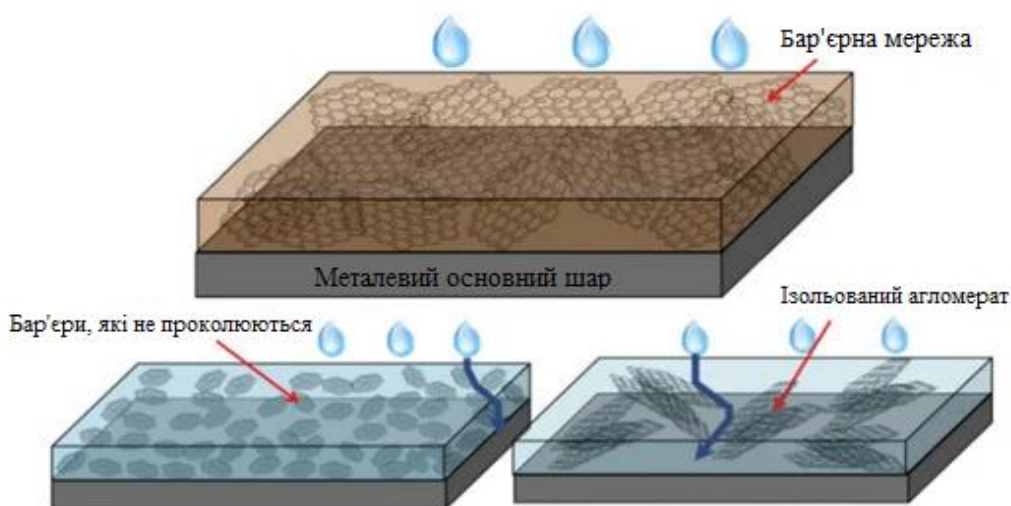


Рис. 3. Схеми критичних факторів на бар'єрні властивості композитних покриттів, зміцнених графеном поліуретану

Вуглецеві наноматеріали з листя *Eucalyptusglobulus* були вироблені екологічно чистим процесом для зміцнення покриття на основі касторової олії PU. Їх результати показали великі антикорозійні властивості із 2-відсотковою вуглецевою золи з листя *Eucalyptusglobulus*. Як приклад було розроблено нове водорозчинне PU покриття з відмінними антикорозійними властивостями за допомогою додавання лише 2 % багатостінних вуглецевих нанотрубок (MCNT) як наповнювача [13]. MCNT діють як бар'єр, збільшуючи тортуюзність шляху дифузії для проникного корозійного електроліту.

Нанокристалічна целюлоза використовується як екологічно чистий підсилювач для покращення корозійної стійкості та механічних властивостей поліуретанових (PU) покриттів. Окрім того, антикорозійна поведінка нон-ізоціанатних поліуретанів (NIPU) може бути підвищена шляхом додавання таких наповнювачів, як наночастинки оксиду цинку (ZnO). Такий підхід використовується у катодних антикорозійних покриттях; проте висока поверхнева енергія та велика площа поверхні частинок ZnO схильні до агрегації. Щоб вирішити цю проблему, були досліджені різні способи поверхневої обробки частинок ZnO з використанням силанових сполук, що демонструє збільшення антикорозійних властивостей покриття.

4. Акрилові фарби. Акрилові фарби, які є водорозчинними покриттями, вважаються більш екологічними, ніж класичні епоксидні або PU покриття. Однак формування щільної перехресної мережі у водорозчинному акриловому покритті є складним, що обмежує його довговічність та антикорозійні властивості. Щоб подолати цей недолік, дослідники зосередили зусилля на модифікації полімерного покриття шляхом додавання неорганічних або органічних матеріалів.

Чисті акрилові покриття мають тенденцію утворювати поверхні з великою кількістю мікропористих дефектів, які можуть формуватися під час процесу висихання. Додавання графеномодифікованих нанопластинок  $\text{CeO}_2$  у водорозчинне акрилове покриття сприяє зменшенню кількості мікропор і збільшенню антикорозійної продуктивності остаточної фарби. Це обумовлено поєднанням відмінної бар'єрної стабільності графену та хороших інгібіторних властивостей  $\text{CeO}_2$ , які можуть запобігати корозії через вивільнення  $\text{Ce}^{3+}$ . Запропонований авторами механізм показаний на рисунку 4.

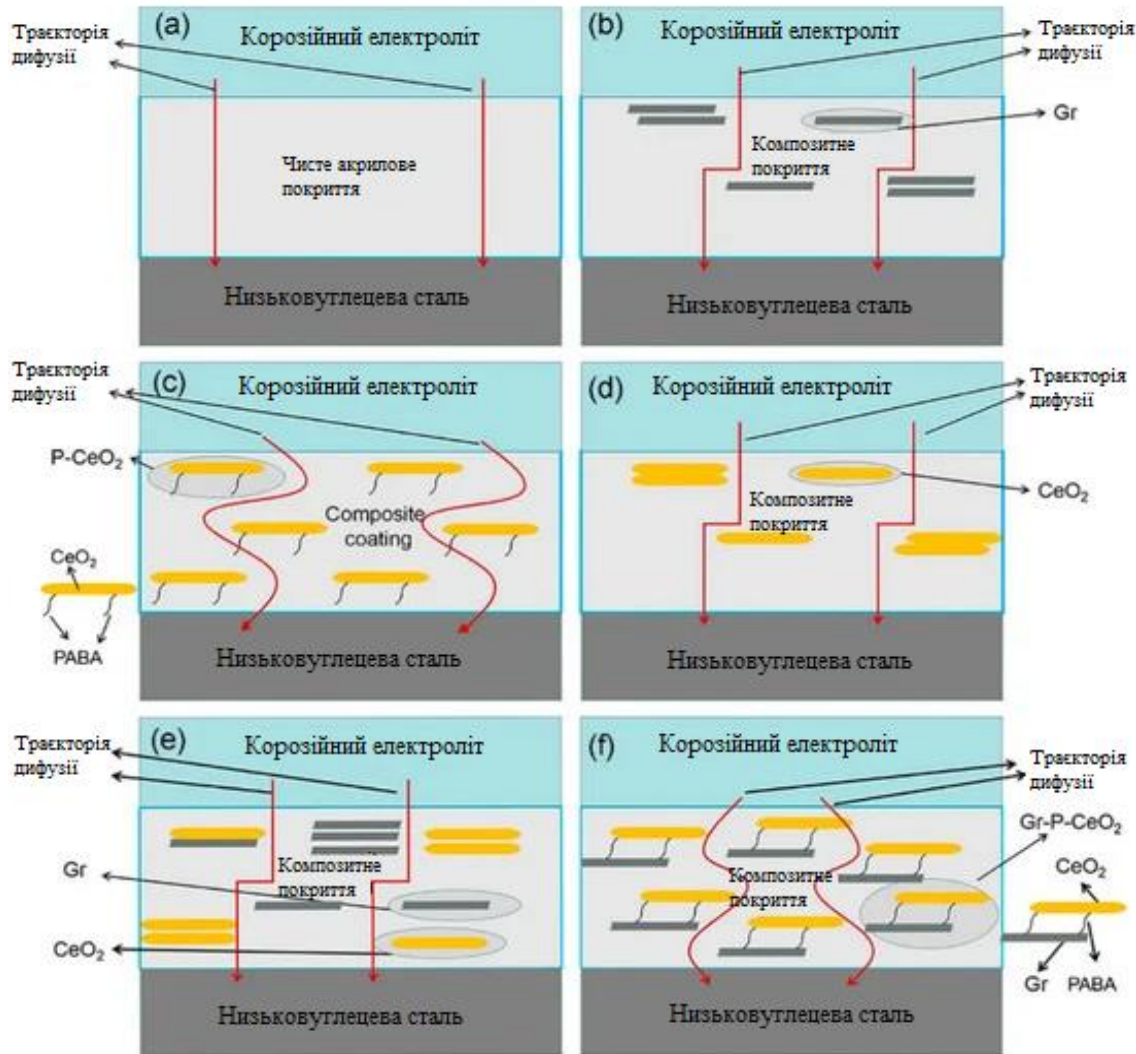


Рис. 4. Схематичне зображення механізму корозії покриттів  $\text{Gr-P-CeO}_2$  з різними бар'єрами на підкладці з м'якої сталі

На рисунку 4 показано схематичне зображення механізму корозії покриттів  $\text{Gr-P-CeO}_2$  з різними бар'єрами на підкладці з м'якої сталі (a) без бар'єру, (b) Gr (графен), (c) нанопластівці  $\text{CeO}_2$ , модифіковані PABA (р-амінобензойна кислота), (d) немодифіковані нанопластівці  $\text{CeO}_2$ , (e)  $\text{Gr-CeO}_2$ , агломерація між  $\text{CeO}_2$  і Gr знижує корозійну стійкість, (f) найкраща антикорозійна здатність, оскільки для зв'язування Gr і  $\text{CeO}_2$  використовується PABA разом шляхом хімічного зв'язування, що покращує дисперсію наповнювачів у покритті.

Двовимірні матеріали можуть бути вбудовані в акрилові покриття для значного покращення корозійної стійкості композитних покриттів завдяки їх стабільним хімічним та фізичним властивостям і унікальній морфології. Найбільш поширені двовимірні матеріали – це графен та матеріали, подібні до графену, як-от дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ). Були введені нанолісти  $\text{MoS}_2$  в акрилову емульсію, створюючи тривимірну мережеву структуру з точками хімічного зшивання.

Додавання листів  $\text{MoS}_2$  до покриття сприяє інгибуванню передачі корозійного середовища та зниженню гідрофобності покриття. Вуглецеві нанотрубки (CNT) є ще одним агентом підсилення для акрилових покриттів, оскільки наявність CNT зменшує пористість [14]. Дифузія та поглинання води в покритті CNT / акрил відбуваються повільніше ніж у вихідному акриловому покритті.

Були використані наночастинки кремнезему, отримані з рисового лушпиння за допомогою екологічно чистого процесу, як ефективний наповнювач для антикорозійних акрилових покриттів.

Органічно-неорганічні гібридні покриття, що складаються з поліметилметакрилату (РММА), забезпечують високоєфективні антикорозійні покриття, особливо коли РММА ковалентно зв'язане з наночастинками церію. Електрохімічна характеристика результируючих гібридних покриттів показала значне поліпшення антикорозійних властивостей, з модулем імпедансу на 8 порядків вищим, ніж у чистій вуглецевій сталі після 6 місяців впливу сольового розчину.

Використання екологічних інгібіторів корозії також є потенційним шляхом для впровадження більш екологічно чистих акрилових покриттів на ринок. Водний екстракт листя хни досліджується як інгібітор корозії для вуглецевої сталі, нікелю та цинку в лужних, нейтральних та кислотних розчинах. Науковці оцінювали антикорозійну поведінку екстракту листя хни, що входить в акрилову смолу, для захисту алюмінієвого сплаву 5083 від корозії. Спостерігалось утворення провідних шляхів, що знижували захисні властивості.

У сфері автомобільної промисловості нові тенденції у розробці екологічно чистих антикорозійних покриттів набирають оберти останні 15–20 років. Основні напрями – це водорозчинні, високотверді та ультрафіолетові покриття з ефектом затвердіння. Ці технології досі знаходяться у стадії дослідження для розробки нових або вдосконалених продуктів. Велика кількість покриттів із низьким вмістом VOC або без VOC вже доступна на ринку.

Серед інноваційних технологій у галузі екологічно чистих полімерних покриттів, які спрямовані на боротьбу з корозією деталей чи виробів, виділяють п'ять основних груп (рис. 5): розумні добавки, гіперрозгалужені/гібридні полімерні технології, зелені інгібітори корозії, біобазовані матеріали та супергідрофобні покриття.

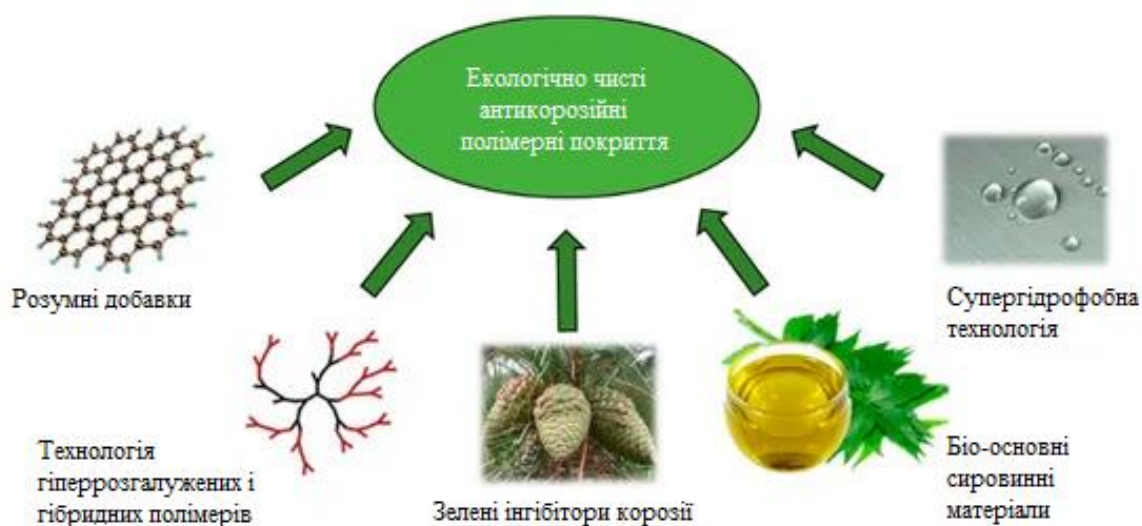


Рис. 5. Схематичне зображення нових тенденцій у сферах захисних покриттів, спрямованих на екологічні рішення

Використання розумних добавок для покращення властивостей антикорозійного покриття є новим трендом. Зокрема використання графену є привабливим через його відмінні антикорозійні властивості, оскільки графен діє як бар'єр у покритті, перешкоджаючи проникненню корозійних агентів.

Використання рослинних екстрактів як зелених інгібіторів корозії також привертає увагу науковців. Наприклад, поліфеноли, екстраговані з різних рослинних джерел, використовувалися для покращення антикорозійних властивостей покриттів.

Останні дослідження в галузі біобазованих матеріалів містять використання ізосорбиду, який отримують із глюкози за низькою ціною, як реагент із 3-гліцидилоксипропілтриметоксисиланом для отримання біобазованого епоксиду. Покриття, сформоване з додаванням наночастинок кремнезему та гідрофобного затверджувача, покращує захист від корозії.

Супергідрофобні полімерні покриття можуть бути підготовлені шляхом введення функціональностей з низькою поверхневою енергією в матрицю покриття, а також наноматеріалів для збільшення шорсткості поверхні. Супергідрофобність також важлива для антифулінгу, антильоду та захисту від біокорозії, що робить ці покриття цікавими для застосувань, де потрібна багатофункціональність. Саме тому супергідрофобні покриття можна вважати дуже перспективною стратегією для досягнення екологічно чистих антикорозійних рішень.



## Висновки

Нові технології та матеріали у фарбуванні та лакуванні сприяють виробництву автомобілів вищої якості, забезпечуючи їх довговічність та зменшуючи екологічний вплив. Впровадження нових технологій та матеріалів у процес фарбування автомобілів є головним фактором у покращенні якості, екологічності та продуктивності, що важливо для задоволення сучасних вимог ринку та стандартів екологічної безпеки. Останні тенденції в розробці екологічно чистих антикорозійних покриттів спрямовані на водорозчинні, високотверді та ультрафіолетові покриття з ефектом затвердіння, а також на інноваційні напрями, зокрема розумні добавки, гіперрозгалужені технології, зелені інгібітори, біобазовані матеріали та супергідрофобні покриття. Використання нових матеріалів і технологій для покриттів обумовлено потребою в екологічності, ефективності та довговічності. Незважаючи на значний прогрес, існують обмеження у впровадженні деяких нових технологій, які насамперед пов'язані з економічною вигідністю та масштабованістю. Тому подальші дослідження повинні зосередитися на оптимізації технологій і матеріалів для забезпечення вищої ефективності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Автомобільна фарба. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive\\_paint](https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_paint)
- [2] Self-healing coatings. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670844.2023.2195772#:~:text=%23%20%E3%80%903%E2%80%A0Full%20article%3A%20Self,Full%20Article%20Figures%20%26%20data>
- [3] Поліуретанові мікрокапсули для само відновлювальних лакофарбових покриттів. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ra/c4ra00213j/unauth>
- [4] Advances in Anti-Corrosion Polymeric and Paint Coatings on Metals: Preparation, Adhesion, Characterization and Application. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/7/1216#:~:text=A%20variety%20of%20topics%20will,issues%20dealing%20with%20corrosion>
- [5] Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії / Павленко В. М. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2003. Том 18. Вип. 2. С. 127–133.
- [6] Synthesis and application of epoxy resins: A review / Jin F.-L. et al. *Eng. Chem.* 2015. № 29. P. 1–11.
- [7] Ortiz P., Vendamme R., Eevers W. Fully Biobased Epoxy Resins from Fatty Acids and Lignin. *Mol.* 2020. № 25. P. 1158.
- [8] Linear polyesters as effective corrosion inhibitors for steel rebars in chloride induced alkaline medium – An electrochemical approach / Unnisa C. B. N. et al. *Constr. Build. Mater.* 2018. № 165. P. 866–876
- [9] Effect of polyalcohols on the anticorrosive behaviour of alkyd coatings prepared with drying oils / Hadzich A. et al. *Prog. Org. Coat.* 2020. № 145. P. 105671.
- [10] Alkyd resins based on hyperbranched polyesters and PET waste for coating applications / Ikladiou N. E. et al. *Prog. Org. Coat.* 2017. № 102. P. 217–224.
- [11] Effect of polyether / polyester polyol ratio on properties of waterborne two-component polyurethane coatings / Li S. et al. *Prog. Org. Coat.* 2020. № 141. P. 105545.
- [12] Functional soybean oil-based polyols as sustainable feedstocks for polyurethane coatings / Alagi P. et al. *Ind. Crop. Prod.* 2018. № 113. P. 249–258
- [13] Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings / Li J. et al. *Compos. Sci. Technol.* 2016. № 129. P. 30–37.
- [14] The effects of carbonized Eucalyptus globulus leaves on castor seed oil based urethane coating system / Siyanbola T. et al. *Prog. Org. Coat.* 2019. № 131. P. 42–48.

**Павленко В'ячеслав Миколайович** – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів, e-mail: [vp.khadi@gmail.com](mailto:vp.khadi@gmail.com)

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

**Кужель Володимир Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: [kuzhel2017@gmail.com](mailto:kuzhel2017@gmail.com), [kuzhel\\_v@vntu.edu.ua](mailto:kuzhel_v@vntu.edu.ua)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Семенченко Сергій Володимирович** – підполковник, старший викладач кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [ssv4055@ukr.net](mailto:ssv4055@ukr.net)

**Корнєв Олександр Васильович** – викладач кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [naumenko197@ukr.net](mailto:naumenko197@ukr.net)

**Черненко Павло Володимирович** – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки e-mail: [Pav.chernenko@ukr.net](mailto:Pav.chernenko@ukr.net)

Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

V. Pavlenko<sup>1</sup>  
V. Kuzhel<sup>2</sup>  
S. Semchenko<sup>3</sup>  
O. Korniev<sup>3</sup>  
P. Chernenko<sup>3</sup>

## The newest technologies in environmentally safe polymeric coatings: research, technologies, prospects

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>3</sup>National Academy of the National Guard of Ukraine

*The scientific work is aimed at the study of environmentally friendly polymer coatings in the automotive industry, which constantly attracts the attention of scientists and practitioners. The article analyzes the current state of technology in this area, reviews the latest research and technological developments, and discusses their prospects for implementation in production. Starting with a review of the latest research on paints and coatings, the paper goes on to discuss self-healing materials and microcapsules that have the potential to create resistant and durable coatings.*

*The paper also discusses anti-corrosion coatings, which are an important part of protecting automotive structures from the effects of negative environmental factors. Particular attention is paid to the development of environmentally friendly polymer coatings that meet the requirements of sustainable development and reduce the environmental impact of the industry on the environment.*

*In addition, the latest trends in the industry are analyzed, which allows us to predict further directions of technology development and implementation of innovative solutions. The work has important practical application in the automotive industry, contributing to improving the quality of automotive coatings protection against corrosion and extending their service life in various operating conditions. The work is aimed at highlighting relevant aspects of research in the field of environmentally friendly polymer coatings and provides a valuable contribution to the development of this important industry. The results will improve the quality and duration of corrosion protection of paintwork, metal structures and other products.*

*The use of the latest materials and technologies in the manufacture of coatings is driven by the need for their environmental friendliness, efficiency and durability. However, the introduction of some new technologies faces limitations, in particular, related to their economic feasibility and scalability. In this regard, further research is needed to optimize technologies and materials to achieve greater efficiency in road transport.*

**Key words:** automobile, research, corrosion, paintwork, environmental safety, anti-corrosion coatings, paint.

**Pavlenko Viacheslav** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Technical operation and service of cars department, e-mail: [vp.khadi@gmail.com](mailto:vp.khadi@gmail.com)

**Kuzhel Volodymyr** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Automobiles and transport management department, e-mail: [kuzhel2017@gmail.com](mailto:kuzhel2017@gmail.com), [kuzhel\\_v@vntu.edu.ua](mailto:kuzhel_v@vntu.edu.ua)

**Semchenko Serhii** – Lieutenant-colonel, Senior Lecturer of the Department of armored vehicles, e-mail: [ssv4055@ukr.net](mailto:ssv4055@ukr.net)

**Korniev Oleksandr** – Lecturer, Department of armored vehicles, e-mail: [naumenko197@ukr.net](mailto:naumenko197@ukr.net)

**Chernenko Pavlo** – Senior Lecturer, Department of armored vehicles, e-mail: [Pav.chernenko@ukr.net](mailto:Pav.chernenko@ukr.net)