

КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 620.197:678.686

- Мілана Мацюра магістр у галузі матеріалознавства, випускниця кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: milana20001116@gmail.com*
- Віра Савченко кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: savchen2017@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-4305-0097
- Олександр Петрашов старший викладач кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: 04rauchan11@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-4880-2216
- Валентина Повзло старший викладач кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: pan431@ukr.net*, ORCID: 0000-0003-3458-9821
- Олексій Воскобойнік доктор фармацевтичних наук, професор, професор кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: a.yu.voskoboynik@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-5790-3564

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗИЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ СМОЛ

Мета роботи. Узагальнення та критичний аналіз опублікованих наукових даних присвячених модифікації покриттів на основі епоксидних полімерів з метою підвищення їх антикорозійних властивостей

Методи дослідження. Підбір літературних джерел здійснювався з використанням бібліографічних баз Google Scholar та Scopus. Ключові слова для пошуку були «епоксидні смоли», «епоксидні полімери», «епоксидні покриття», «антикорозійна дія/активність» та «інгібітори корозії» українською та англійською мовами.

Отримані результати. Проведено критичний аналіз 22 опублікованих робіт щодо сучасних підходів до покращення службових властивостей антикорозійних покриттів на основі епоксидних полімерних матеріалів. Узагальнено відомості щодо найбільш ефективних підходів до модифікації епоксидних полімерних матеріалів для створення захисних покриттів. Показано, що серед нанорозмірних модифікаторів епоксидних покриттів найбільш дослідженими є вуглецеві матеріали, зокрема нанотрубки та модифікований графен. Ще одним перспективним напрямом покращення антикорозійних властивостей епоксидних полімерів є їх поєднання з полімерами іншої природи. Найбільш інтенсивно досліджуються поєднання епоксидних полімерів з поліанілінами, поліідолами, а також біополімерами. Ще одним перспективним напрямком підвищення антикорозійних властивостей епоксидних смол є їх модифікація гетероциклічними сполуками, фосфорорганічними сполуками, кремнійорганічними сполуками та амінокислотами.

Наукова новизна. Виявлено, що значна кількість досліджень присвячена введенню до складу епоксидних покриттів нанорозмірних матеріалів, а також комбінування епоксидної матриці полімерами іншої природи, в тому числі біополімерами. Також, активно досліджується в якості модифікаторів епоксидних смол органічні сполуки різної будови, зокрема гетероциклічні сполуки, амінокислоти тощо.

Практична цінність. Результати роботи можуть бути використані інженерами та науковими співробітниками для планування досліджень та конструкторських робіт, що включають розробку складу антикорозійних захисних покриттів.

Ключові слова: епоксидні полімери, покриття, антикорозійні властивості, наноматеріали.

Вступ

Епоксидні смоли протягом багатьох десятиліть залишаються одними з найуніверсальніших полімер-

них матеріалів, які знайшли широке застосування в різних галузях техніки. Цей клас сполук вирізняється високими механічними характеристиками, хімічною

стійкістю та привабливими декоративними властивостями. Їхня популярність також зумовлена відносно низькою вартістю, доступністю й технологічною гнучкістю, оскільки процес тверднення не потребує складного обладнання чи специфічних умов. Однією з основних сфер використання епоксидних смол є створення на їх основі захисних покриттів, зокрема для підвищення корозійної стійкості металевих виробів. Високі адгезійні властивості епоксидних полімерів та їх відносна хімічна інертність сприяють ефективному виконанню цих функцій. Попри загалом задовільні експлуатаційні характеристики таких покриттів, дослідження, спрямовані на покращення їх антикорозійних властивостей, залишаються актуальними [1–3]. Зокрема, поява наноматеріалів, введення яких у полімерну матрицю суттєво підвищує ефективність захисних покриттів, значно активізувала наукові розробки в цьому напрямі. Цей огляд є спробою узагальнити сучасні результати досліджень, присвячених удосконаленню покриттів на основі епоксидних смол.

Мета роботи

Метою представленого огляду є узагальнення та критичний аналіз опублікованих наукових даних присвячених модифікації покриттів на основі епоксидних полімерів з метою підвищення їх антикорозійних властивостей.

Матеріал і методика досліджень

Підбір літературних джерел здійснювався з використанням бібліографічних баз Google Scholar та Scopus. Ключові слова для пошуку були «епоксидні смоли», «епоксидні полімери», «епоксидні покриття», «антикорозійна дія/активність» та «інгібітори корозії» українською та англійською мовою.

Обговорення

У роботі Zhou та співавторів [4] лізін використовувався для обробки поверхні нанолістів оксиду графену для виготовлення наноматеріалів лізін-оксид графену, що були включені в епоксидні покриття. Показано, що введення комплексу лізін – оксид графену значно покращує функціональні властивості покриття на основі епоксидних смол. Більше того, комплекс лізін-оксид графену також може підвищити щільність перехресних зв'язків в покритті на основі епоксидних смол внаслідок реакції між епоксидними фрагментами та аміно-групами у складі лізину. За допомогою електрохімічних досліджень та випробувань методом сольового туману встановлено, що включення комплексу лізін-оксид графену значно покращили антикорозійні властивості порівняно з покриттям на основі чистої епоксидної смоли.

Група науковців КНР [5] розробили гідрофобне епоксидне покриття, що містить залишки бензоксазину. Зазначене покриття, було отримано з використанням мономеру бензоксазину як затверджувача. Гідрофобність епоксидних покриттів була значно підвищена введенням залишків бензоксазину, кути контакту з водою отриманих покриттів були вищими ніж 98 °.

Опір перенесенню заряду (R_{ct}) розроблених покриттів збільшився приблизно на три порядки порівняно з непокритою м'якою сталлю, а значення ефективності захисту зразків становили понад 98 %. Підвищення антикорозійних властивостей автори пов'язують з високими гідрофобними властивостями розроблених покриттів.

Дослідження Dagdag зі співавторами [6] зосереджено на теоретичній та експериментальній оцінці стабільності антикорозійного покриття для низьколегованої сталі 15CDV6 на основі епоксидної смоли та поліаміноаміду. Показано, що зазначена комбінація має сильну схильність до адгезії та пригнічує корозійне розчинення поверхні сталі 15CDV6 у симульованому морському середовищі.

Тією ж науковою групою [7] було розроблено склад антикорозійного покриття високої міцності для вуглецевої сталі. Покриття складається з високомолекулярної епоксидної смоли на основі дигліцидилового ефіру, бісфенолу S та затверджувача метилендіаніліну (MDA). Покриття діє як ефективний антикорозійний засіб протягом тривалого часу (180 днів). Квантово-хімічні дослідження методом DFT показали, що розроблені покриття мають здатність взаємодіяти з поверхнею металу через електрон надлишкові центри. Моделювання показало, що розроблене покриття ефективно адсорбується на підкладці (металевій поверхні). Необхідно зазначити, що теоретичні дослідження здебільшого корелювали з експериментальними даними.

Дослідження Kamalon Rajitha [8] зі співавторами присвячено розробці ефективного антикорозійного покриття для м'якої сталі на біологічній основі. У цій роботі досліджено ефективність захисту від корозії епоксидного покриття з включеннями модифікованого желатину і нанокompозиту на основі модифікованого желатину та оксиду графену. Результати показали високі захисні характеристики одержаних композиційних покриттів. Добре диспергований оксид графену збільшує компактність і ступінь зшивання покриття і, таким чином, покращує ефективність захисту на 59 % порівняно з покриттям без включень.

Робота Saurav Ramesh Nayak [9] зі співавторами спрямована на підвищення антикорозійних характеристик епоксидної смоли шляхом включення нанокompозиту на основі функціональної багатощарової вуглецевої нанотрубки та полііндолу. Результати показали, що нанокompозитне покриття з суміші 0,25 мас. % нанокompозиту демонструє відмінні антикорозійні та бар'єрні властивості. Рівномірне диспергування наноаповнювача робить його відмінним матеріалом для покриття з метою антикорозійного захисту.

Органо-неорганічні нанокompозитні захисні покриття були одержані золь-гелевим методом з використанням 3-гліцидоксипропіл-триметоксисилану, тетраметоксисилану або тетраетоксисилану [10]. Крім того, наночастинки TiO_2 та $AlOOH$ були отримані з тетра-н-бутилтитанату та бутюксид алюмінію відповідно для дослідження їх захисної дії на 3-гліцидоксипропіл-три-

метоксисилан. Результати показали, що захист від корозії гібридних покриттів залежить головним чином від вмісту силану, типу прекурсору силану та типу наночастинок.

У дослідженні Ai та співавторів [11] був запропонований легкий метод для надання як вогнезахисних, так і антикорозійних властивостей епоксидним смолам шляхом хімічного введення біфункціональних фосфорвмісних похідних триазолу. Епоксидний термореактивний матеріал з вмістом 5 мас.% модифікатора продемонстрував відмінну вогнестійкість, а ефективність захисту від корозії при додаванні модифікатора зросла на 95,3 % порівняно з чистою епоксидною смолою. Завдяки водневим зв'язкам і π - π взаємодіям, викликаним введенням модифікатора, епоксидна смола також мала покращені механічні властивості у випробуваннях на розтяг і згин.

Робота Ehsan Bakhshandeh [12] присвячена розробці та виробництву органо-неорганічних гібридних покриттів на основі епоксидної смоли дигліцидилового ефіру бісфенолу та продуктів гідролізу тетраетоксисилану. Отримані гібридні матеріали після отвердження можуть бути використанні в якості потенційних антикорозійних покриттів. Показано, що концентрація модифікаторів епоксидних смол суттєво впливає на механічні та термічні властивості покриттів, а корозійна стійкість покриттів покращується зі збільшенням вмісту неорганічної фази.

Chen та співавтори [13] одержали наночастинок поліаніліну, легованого перфтороктановою кислотою (PFOA/PANI) за допомогою окислювальної полімеризації при опроміненні ультразвуком. Отримані наночастинок PFOA/PANI показали високу гідрофобність, а модифіковане покриття PFOA/PANI/EP продемонструвало вищі корозійні властивості у порівнянні з немодифікованими епоксидними смолами.

У дослідженні Tomić та співавторів [14] епоксидні нанокомпозити та епоксидні покриття на основі нанокомпозитів були виготовлені методом інтеркаляції розчину з використанням Cloisite 30B як нанорозмірного компоненту. Результати випробування показали, що антикорозійні властивості епоксидних покриттів у присутності 3 мас.% і особливо 1 мас.% Cloisite 30B були значно вищими у порівнянні з немодифікованими епоксидними смолами.

Захист від корозії вуглецевої сталі Q235 за допомогою епоксидних покриттів, що містять поліанілінові нановолокна, леговані фітиноювою кислотою (PANI-PANFs), був досліджений у роботі наукової групи у складі Нао та інші. [15] Авторами показано, що питома площа та інгібіторне навантаження підготовлених PANI-PANF становить $69,4 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ і 10,3% відповідно. Також показано, що додаткове введення бензотриазолу (BTA) до складу покриття значно покращує його властивості.

В статті Hsissou та співавторів [16] було досліджено можливість використання сірковмісних епоксидних смол (SER) на основі дигліцидил-біс-дисульфиду вуглецевого естеру бісфенолу, що зшиті через гексаме-

тилендіамін (HMDA) і метилендіамін (MDA) як потенційних антикорозійних покриттів. Результати електрохімічних досліджень показали, що одержані антикорозійні епоксидні композитні покриття в 3,5 % розчині NaCl мають на 97,9 % кращі антикорозійні властивості у порівнянні з звичайними епоксидними покриттями. Скануюча електронна мікроскопія показала, що композиційні полімери SER/HMDA і SER/MDA можуть значно сповільнювати атаку іонів хлориду. Обчислювальні підходи молекулярної динаміки підтверджують одержані експериментальні дані.

У дослідженні Izadi та співавторів [17] антикорозійні властивості епоксидного покриття було покращено шляхом модифікації поверхні сталі за допомогою гібридної золь-гель системи, наповненої наноматеріалами з «зеленими» інгібіторами корозії. Було встановлено, що ефективність інгібування корозії панелей з покритою м'якої сталі була значно покращена завдяки використанню системи активного багатопорового матеріалу. Показано, що вивільнення інгібітору з наноконтейнерів на поверхні розділу плівка/сталь призводить до сповільнення як анодних так і катодних реакцій, що веде до зниження швидкості відшарування покриття від підкладки та утворення продуктів корозії. Додатково встановлено, що інгібіторні агенти вивільнялися в область подряпин і блокували активні центри на поверхні металу. Виражений антикорозійний ефект покриття був підтверджений за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS), сканування електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDS).

Органо-неорганічне гібридне покриття на основі дигліцидилового естеру бісфенолу А (BADGE) та наночастинок неорганічного кремнезему та наночастинок оксиду цинку було виготовлено для антикорозійного застосування [18]. Результати випробування методом сольового туману показало, що металева підкладка все ще не була повністю кородованою через 68 днів.

У роботі Liu зі співавторами [19] було описано багатопоровий двовимірний (2D) ковалентний органічний каркас TrPa-1, що був синтезований як наноконтейнер для виготовлення самовідновлюваного епоксидного покриття. Інгібітор корозії бензотриазол (BTA) вводили в пористий TrPa-1 ємність якого було додатково покращено за допомогою електростатичної адсорбції. Одержане композиційне покриття показало високі захисні властивості за результатами електрохімічних досліджень.

Rodriguez та співавтори розробили [20] епоксидне покриття з нанорезервуарами інгібітора корозії сталей, що покриті системою Mg-Zn. Щоб досягти цього, подвійні гідроксиди Mg-Al, модифіковані бензотриазолом (LDH-BTA) були синтезовані методом співосадження. Було показано, що молекули бензотриазолу, присутні на поверхні вивільняються в присутності хлорид аніонів, таким чином взаємодіючи з металевою поверхнею та підвищуючи корозійну стійкість.

У дослідженні Abbout та співавторів [21] пентаглицидиловий етер пентафеноксифосфору вивчався як

інгібітор корозії за допомогою різних методів. Авторами показано, що введення зазначеного інгібітора до складу епоксидних полімерних покриттів значно підвищує їх корозійну стійкість в агресивних середовищах. Ефективність інгібітора досягає 95 % при його вмісті 10^{-3} М. Теоретичні розрахунки методами молекулярної механіки та *ab initio* демонструють чудову кореляцію з експериментальними даними.

Suleiman зі співавторами [22] одержали нові гібридні золь-гелеві матеріали на основі кремній-епоксидних композитних смол з'єднанням різноманітних аміносиланів з епоксидною смолою DER736 з наступним золь-гель процесом *in situ*, та подальшим введенням уретанових частинок до кінцевих покриттів. Результати показали, що покриття, отримані з триалкоксиланів демонструють найкращі механічні, антикорозійні та адгезійні властивості при нанесенні на поверхню м'якої сталі порівняно з усіма іншими покриттями.

Дослідженню можливості створення антикорозійних покриттів на основі епоксидних полімерів та похідних церію присвячено публікацію Van Soestbergen та співавторів [23]. Показано, що введення дибутилфосфату у епоксидні покриття значно підвищує їх антикорозійні властивості.

Wonnice Ma зі співавторами [24] присвятили своє дослідження вивченню впливу нанорозмірного хітозану на властивості покриттів. Нанохітозан (NCH) був підготовлений як зміцнюючий агент нанонаповнювача, який був включений у захисне покриття для запобігання корозії. Результати показали, що всі нанокompозитні покриття на основі епоксидної смоли, що містять NCH, значно перевищують за своїми антикорозійними властивостями не наповненні покриття.

У дослідженні Zheng та співавторів [25] повідомляється про екологічно чисте гідрофобне покриття на основі біоепоксидної смоли з використанням води як єдиного розчинника під час підготовки. Покриття було виготовлено шляхом введення супергідрофобних наночастинок SiO_2 , гідрофобного затверджувача і гексадецилтриметоксисилану в епоксидну смолу на основі ізосорбиду за допомогою процесу одноетапного спінування. Покриття демонструє високу гідрофобність з кутом контакту з водою (CA) $134 \pm 3^\circ$. Встановлено, що це вже підготовлене покриття має добру механічну міцність проти піщаної ерозії, також зберігає високий рівень здатності відштовхувати воду. Крім того, отримане покриття демонструє зменшення на один порядок густини струму корозії (I_{corr}) та позитивний зсув потенціалу корозії (E_{corr}) від $-1,008$ В до $-0,747$ В та ефективність інгібування корозії 92 %.

Висновки

Проведений літературний огляд засвідчив високий рівень уваги, що приділяється розробці інноваційних антикорозійних покриттів на основі епоксидних смол. Виявлено, що основна кількість досліджень присвячена введенню до складу епоксидної матриці різноманітних наноматеріалів. Ще одним з перспективних

напрямків є комбінування епоксидної матриці з полімерами іншої природи, зокрема поліанілінами, полііндолами та біополімерами. Також, активно досліджується в якості модифікаторів епоксидних смол органічні речовини, зокрема гетероциклічні сполуки, амінокислоти фосфор- та кремнійорганічні сполуки. В роботах, що присвячені комбінуванню епоксидних полімерів з сполуками гетероциклічної природи здебільшого описані модифікатори, що містять триазольні фрагменти. Зазначене актуалізує дослідження, метою яких є розробка антикорозійних покриттів на основі епоксидних полімерів та модифікаторів, що є похідними відмінних від триазолів гетероциклічних систем.

Список літератури

1. Мартинюк М. І. Епоксидні смоли і композитні матеріали на їх основі (огляд) / М. І. Мартинюк, Г. О. Сіренко, Л. Я. Бойко // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. – 2014. – № 18. – С. 115–132.
2. Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review / C. Verma, L. O. Olasunkanmi, E. D. Akpan et al. // Reactive and Functional Polymers. – 2020. – № 156. – 104741. doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741.
3. Pulikkalparambil H. Corrosion protective self-healing epoxy resin coatings based on inhibitor and polymeric healing agents encapsulated in organic and inorganic micro and nanocontainers / H. Pulikkalparambil, S. Siengchin, J. Parameswaranpillai // Nano-Structures & Nano-Objects. – 2018. – № 16. – P. 381–395. doi:10.1016/j.nano.2018.09.010.
4. Facile modification of graphene oxide with Lysine for improving anti-corrosion performances of water-borne epoxy coatings / X. Zhou, H. Huang, R. Zhu, et al. // Progress in Organic Coatings. – 2019. – 105200. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.06.04.
5. Hydrophobic benzoxazine-cured epoxy coatings for corrosion protection / C. Zhou, X. Lu, Z. Xin et al. Zhang // Progress in Organic Coatings. – 2013. – № 76 (9). – P. 1178–1183. doi:10.1016/j.porgcoat.2013.03.01.
6. DGEBA-polyaminoamide as effective anti-corrosive material for 15CDV6 steel in NaCl medium: Computational and experimental studies / O. Dagdag, A. Berisha, Z. Safi et al. // Journal of Applied Polymer Science. – 2019. – №137 (8). – 48402. doi:10.1002/app.48402.
7. Highly durable macromolecular epoxy resin as anticorrosive coating material for carbon steel in 3% NaCl: Computational supported experimental studies / O. Dagdag, A. Berisha, Z. Safi et al. // Journal of Applied Polymer Science. – 2020. – 49003. doi:10.1002/app.49003.
8. Evaluation of anti-corrosion performance of modified gelatin-graphene oxide nanocomposite dispersed in epoxy coating on mild steel in saline media / R. Kamalon, N. Kikkeri, M. Shetty et al. // Colloids and Surfaces A. – 2020. – № 587. – 124341. doi:10.1016/j.colsurfa.2019.124341.
9. Saurav R. N. Functionalized multi-walled carbon nanotube/polyindole incorporated epoxy: An effective anti-corrosion coating material for mild steel / R. N.

- Saurav, N.S. M. Kikkeri, B. H. Mahesh et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – № 856. – 158057. doi:10.1016/j.jallcom.2020.158057.
10. Anticorrosive Coatings Prepared Using Epoxy–Silica Hybrid Nanocomposite Materials / H. Abdollahi, A. Ershad-Langroudi, A. Salimi, A. Rahimi // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. – №53(27). – P. 10858–10869. doi:10.1021/ie501289g.
11. Ai Y.-F. Mechanically strong and flame-retardant epoxy resins with anti-corrosion performance. / Y.-F. Ai, L. Xia, F.-Q. Pang et al. // *Engineering Composites Part B*. – 2020. – №193, 108019. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108019.
12. Anti-corrosion hybrid coatings based on epoxy–silica nano-composites: Toward relationship between the morphology and EIS data / E. Bakhshandeh, A. Jannesari, Z. Ranjbar et al. // *Progress in Organic Coatings*. – 2014. – № 77(7). – P. 1169–1183. doi:10.1016/j.porgcoat.2014.04.00.
13. Highly hydrophobic polyaniline nanoparticles for anti-corrosion epoxy coatings / H. Chen, H. Fan, N. Su et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – № 420. – 130540. doi:10.1016/j.cej.2021.130540.
14. The use of nanoclay in preparation of epoxy anti-corrosive coatings / M. D. Tomić, B. Dunjić, V. Likić et al. // *Progress in Organic Coatings*. – 2014. – № 77(2). – P. 518–527. doi:10.1016/j.porgcoat.2013.11.01.
15. Self-healing epoxy coating loaded with phytic acid doped polyaniline nanofibers impregnated with benzotriazole for Q235 carbon steel / Y. Hao, Y. Zhao, X. Yang et al. // *Corrosion Science*. – 2019. – P. 175–189. doi:10.1016/j.corsci.2019.02.023.
16. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5 % NaCl solution: Experimental and computational approaches / R. Hsissou, F. Benhiba, S. Echihi et al. // *Chemical Data Collections*. – 2021. – № 31. – 100619. doi:10.1016/j.cdc.2020.100619.
17. Izadi M. Active corrosion protection performance of an epoxy coating applied on the mild steel modified with an eco-friendly sol-gel film impregnated with green corrosion inhibitor loaded nanocontainers / M. Izadi, T. Shahrabi, B. Ramezanzadeh // *Applied Surface Science*. 2018. – №440. – P. 491–505. doi:10.1016/j.apsusc.2018.01.185.
18. Jia Z. Anticorrosive and photocatalytic properties research of epoxy-silica organic–inorganic coating / Z. Jia, R. Hong // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – № 622. – 126647. doi:10.1016/j.colsurfa.2021.126647.
19. Preparation of highly efficient self-healing anti-corrosion epoxy coating by integration of benzotriazole corrosion inhibitor loaded 2D-COF / T. Liu, W. Li, C. Zhang et al. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – № 97. – P. 560–573. doi:10.1016/j.jiec.2021.03.012.
20. Rodriguez J. Incorporation of layered double hydroxides modified with benzotriazole into an epoxy resin for the corrosion protection of Zn-Mg coated steel / J. Rodriguez, E. Bollen, T. D. Nguyen, A. Portier, Y. Paint, M.-G. Olivier // *Progress in Organic Coatings*. – 2020. – № 149. – 105894. doi:10.1016/j.porgcoat.2020.105894.
21. Gravimetric, electrochemical and theoretical study, and surface analysis of novel epoxy resin as corrosion inhibitor of carbon steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. / S. Abbout, R. Hsissou, H. Erramli et al. // *Journal of Molecular Structure*. – 2021. – № 1245. – 131014. doi:10.1016/j.molstruc.2021.131014.
22. Suleiman R. Novel hybrid epoxy silicone materials as efficient anticorrosive coatings for mild steel / R. Suleiman, H. Dafalla, B. El Ali // *RSC Advances*. – 2015. – №5(49). – P. 39155–39167. doi:10.1039/c5ra04500b.
23. Release of cerium dibutylphosphate corrosion inhibitors from highly filled epoxy coating systems / M. Van Soestbergen, V. Baukh, S. J. F. Erich et al. // *Progress in Organic Coatings*. – 2014. – №77(10). – P. 1562–1568. doi:10.1016/j.porgcoat.2013.12.01.
24. Wonnice Ma I. A. Anticorrosion properties of epoxy-nanochitosan nanocomposite coating / I. A. Wonnice Ma, A. Sh, A. K. Arof // *Progress in Organic Coatings*. – 2017. – № 113. – P. 74–81. doi:10.1016/j.porgcoat.2017.08.01.
25. Mechanically robust hydrophobic bio-based epoxy coatings for anti-corrosion application / S. Zheng, D. A. Bellido-Aguilar, Y. Huang et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – № 363. – P. 43–50. doi:10.1016/j.surfcoat.2019.02.02.

Одержано 21.04.2025

MODERN APPROACHES TO ENHANCING THE EFFICIENCY OF EPOXY-BASED ANTICORROSION COATINGS

Milana Matsiura

Master in Materials Science, graduate of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: milana20001116@gmail.com

Vira Savchenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: savchen2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4305-0097

Oleksandr Petrashov	Senior Lecturer, Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 04rauchen11@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4880-2216
Valentyna Povzlo	Senior Lecturer, Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: pan431@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3458-9821
Oleksii Voskoboinik	Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: a.yu.voskoboinik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5790-3564

Purpose. To summarize and critically analyze published scientific data on the modification of epoxy polymer-based coatings in order to improve their anticorrosive properties.

Research methods. The selection of literature sources was carried out using the bibliographic databases Google Scholar and Scopus. The keywords used for the search included: “epoxy resins”, “epoxy polymers”, “epoxy coatings”, “anticorrosion effect/activity”, and “corrosion inhibitors” in both Ukrainian and English.

Results. A critical analysis of 22 published papers on modern approaches to improving the performance of epoxy polymer-based anticorrosion coatings was conducted. The review summarizes the most effective strategies for modifying epoxy polymer materials to develop protective coatings. It has been shown that among the nanoscale modifiers of epoxy coatings, carbon-based materials – particularly nanotubes and modified graphene – are the most extensively studied. Another promising approach to improving the anticorrosive properties of epoxy polymers is their combination with polymers of a different nature. The most intensively studied combinations involve epoxy polymers with polyanilines, polyindoles, and biopolymers. Yet another promising direction for enhancing the anticorrosive properties of epoxy resins is their modification with heterocyclic compounds, organophosphorus compounds, organosilicon compounds, and amino acids.

Scientific novelty. It has been estimated that a significant number of studies focus on the incorporation of nanoscale materials into epoxy coatings, as well as on the combination of the epoxy matrix with polymers of different nature, including biopolymers. Organic compounds of various structures – particularly heterocyclic compounds, amino acids, and others – are also actively investigated as modifiers of epoxy resins.

Practical value. The results of this review can be used by engineers and researchers for planning experimental and design work related to the development of anticorrosive protective coatings.

Key words: epoxy polymers, coatings, anticorrosion properties, nanomaterials.

References

1. Martyniuk, M. I., Sirenko, H. O., & Boiko, L. Ia. (2014). Epoxy resins and composite materials based on them (review) [in Ukrainian]. Bulletin of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Chemistry Series, 18, 115–132.
2. Verma, C., Olasunkanmi, L. O., Akpan, E. D., Quraishi, M. A., Dagdag, O., El Gouri, M., & Ebenso, E. E. (2020). Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review. Reactive and Functional Polymers, 156, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741>
3. Pulikkalparambil, H., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2018). Corrosion protective self-healing epoxy resin coatings based on inhibitor and polymeric healing agents encapsulated in organic and inorganic micro and nano-containers. Nano-Structures & Nano-Objects, 16, 381–395. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2018.09.010>
4. Zhou, X., Huang, H., Zhu, R., Sheng, X., Xi, D., & Mei, Y. (2019). Facile modification of graphene oxide with lysine for improving anti-corrosion performances of waterborne epoxy coatings. Progress in Organic Coatings, 105200. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.04>
5. Zhou, C., Lu, X., Xin, Z., Liu, J., & Zhang, Y. (2013). Hydrophobic benzoxazine-cured epoxy coatings for corrosion protection. Progress in Organic Coatings, 76(9), 1178–1183. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.03.01>
6. Dagdag, O., Berisha, A., Safi, Z., Hamed, O., Jodeh, S., Verma, C., & El Harfi, A. (2019). DGEBA-pol-yaminoamide as effective anti-corrosive material for 15CDV6 steel in NaCl medium: Computational and experimental studies. Journal of Applied Polymer Science, 137(8), 48402. <https://doi.org/10.1002/app.48402>
7. Dagdag, O., Berisha, A., Safi, Z., Dagdag, S., Ber-rani, M., Jodeh, S., & El Harfi, A. (2020). Highly durable macromolecular epoxy resin as anticorrosive coating material for carbon steel in 3% NaCl: Computational supported experimental studies. Journal of Applied Polymer Science, 49003. <https://doi.org/10.1002/app.49003>
8. Kamalon, R., Kikkeri, N., Shetty, M., Avvaduk-kam, M., & Ambale, M. M. (2020). Evaluation of anti-corrosion performance of modified gelatin-graphene oxide nanocomposite dispersed in epoxy coating on mild steel in saline media. Colloids and Surfaces A, 587, 124341. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124341>

9. Saurav, R. N., Kikkeri, N. S. M., Mahesh, B. H., Kamalon, R., Ambale, M. M., & Satishkumar, R. N. (2021). Functionalized multi-walled carbon nanotube/polyindole incorporated epoxy: An effective anti-corrosion coating material for mild steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 856, 158057. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158057>
10. Abdollahi, H., Ershad-Langroudi, A., Salimi, A., & Rahimi, A. (2014). Anticorrosive coatings prepared using epoxy-silica hybrid nanocomposite materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(27), 10858–10869. <https://doi.org/10.1021/ie501289g>
11. Ai, Y.-F., Xia, L., Pang, F.-Q., Xu, Y.-L., Zhao, H.-B., & Jian, R.-K. (2020). Mechanically strong and flame-retardant epoxy resins with anti-corrosion performance. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108019>
12. Bakhshandeh, E., Jannesari, A., Ranjbar, Z., Sobhani, S., & Saeb, M. R. (2014). Anti-corrosion hybrid coatings based on epoxy-silica nanocomposites: Toward relationship between the morphology and EIS data. *Progress in Organic Coatings*, 77(7), 1169–1183. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.04.001>
13. Chen, H., Fan, H., Su, N., Hong, R., & Lu, X. (2021). Highly hydrophobic polyaniline nanoparticles for anti-corrosion epoxy coatings. *Chemical Engineering Journal*, 420, 130540. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130540>
14. Tomić, M. D., Dunjić, B., Likić, V., Bajat, J., Rogan, J., & Djonlagić, J. (2014). The use of nanoclay in preparation of epoxy anticorrosive coatings. *Progress in Organic Coatings*, 77(2), 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.11.010>
15. Hao, Y., Zhao, Y., Yang, X., Hu, B., Ye, S., Song, L., & Li, R. (2019). Self-healing epoxy coating loaded with phytic acid doped polyaniline nanofibers impregnated with benzotriazole for Q235 carbon steel. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.023>
16. Hsissou, R., Benhiba, F., Echihi, S., Benkhaya, S., Hilali, M., Berisha, A., & El Harfi, A. (2021). New epoxy composite polymers as potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5 % NaCl solution: Experimental and computational approaches. *Chemical Data Collections*, 31, 100619. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100619>
17. Izadi, M., Shahrabi, T., & Ramezanzadeh, B. (2018). Active corrosion protection performance of an epoxy coating applied on the mild steel modified with an eco-friendly sol-gel film impregnated with green corrosion inhibitor loaded nanocontainers. *Applied Surface Science*, 440, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.185>
18. Jia, Z., & Hong, R. (2021). Anticorrosive and photocatalytic properties research of epoxy-silica organic-inorganic coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 622, 126647. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126647>
19. Liu, T., Li, W., Zhang, C., Wang, W., Dou, W., & Chen, S. (2021). Preparation of highly efficient self-healing anti-corrosion epoxy coating by integration of benzotriazole corrosion inhibitor loaded 2D-COF. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 97, 560–573. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.012>
20. Rodriguez, J., Bollen, E., Nguyen, T. D., Portier, A., Paint, Y., & Olivier, M.-G. (2020). Incorporation of layered double hydroxides modified with benzotriazole into an epoxy resin for the corrosion protection of Zn-Mg coated steel. *Progress in Organic Coatings*, 149, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105894>
21. Abbout, S., Hsissou, R., Erramli, H., Chebabe, D., Salim, R., Kaya, S., & Hajjaji, N. (2021). Gravimetric, electrochemical and theoretical study, and surface analysis of novel epoxy resin as corrosion inhibitor of carbon steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Journal of Molecular Structure*, 1245, 131014. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131014>
22. Suleiman, R., Dafalla, H., & El Ali, B. (2015). Novel hybrid epoxy silicone materials as efficient anticorrosive coatings for mild steel. *RSC Advances*, 5(49), 39155–39167. <https://doi.org/10.1039/c5ra04500b>
23. Van Soestbergen, M., Baukh, V., Erich, S. J. F., Huinink, H. P., & Adan, O. C. G. (2014). Release of cerium dibutylphosphate corrosion inhibitors from highly filled epoxy coating systems. *Progress in Organic Coatings*, 77(10), 1562–1568. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.12.010>
24. Ma, I. A. W., Sh, A., & Arof, A. K. (2017). Anti-corrosion properties of epoxy-nanochitosan nanocomposite coating. *Progress in Organic Coatings*, 113, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.08.010>
25. Zheng, S., Bellido-Aguilar, D. A., Huang, Y., Zeng, X., Zhang, Q., & Chen, Z. (2019). Mechanically robust hydrophobic bio-based epoxy coatings for anti-corrosion application. *Surface and Coatings Technology*, 363, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.020>