DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-79-89

УДК 629.463.65

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИДНОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ НЕСІВНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Фомін О.В., Козинка О.С., Красулін О.С., Саченок Д.С.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF EPOXY PROTECTIVE COATING FOR LOAD-BEARING METAL STRUCTURES OF RAILWAY TRANSPORT VEHICLES

Fomin O.V., Kozynka O.S., Krasulin A.S., Sachenok D.S.

В роботі було проаналізовано перспективи застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій для залізничного транспорту. Епоксидні смоли відіграють важливу роль у захисті, зміцненні та подовженні терміну служби несучих металоконструкцій, особливо в агресивних середовищах. Сучасні епоксидні покриття розробляються з урахуванням екологічних стандартів і менше шкодять навколишньому середовищу. Використання нанотехнологій дозволяє створювати покриття з кращими властивостями. Дослідження допоможуть знайти оптимальні покриття для різних типів залізничних засобів і умов їх використання, таких як холодний клімат або морські перевезення. Відповідність стандартам безпеки та довговічності є обов'язковою для експлуатації залізничного транспорту, тому важливо вивчати можливості використання епоксидних покриттів. Епоксидні покриття, які добре захищають від корозії, можуть значно подовжити термін служби вагонів, зменшити витрати на ремонт і заміну, а також знизити потребу в частому фарбуванні. Це важливо для вагонів, що перевозять небезпечні вантажі або пасажирів, де надійність конструкцій є особливо важливою. Був проведений аналіз існуючих технологій захисту металевих конструкцій залізничного транспорту від корозії та інших негативних впливів. Технологій захисту металевих конструкцій залізничного транспорту (вагони, платформи, цистерни, візки тощо) від корозії та інших негативних впливів (механічного зносу, вологи, хімії, УФ-випромінювання, вібрацій) Дослідження властивостей епоксидних матеріалів, їх переваг та недоліків у порівнянні з іншими типами захисних покриттів. Вивчення впливу факторів експлуатації залізничного транспорту (вібрації, температурні коливання, агресивне середовище) на довговічність епоксидних покриттів. Вивчення фізико-хімічних, механічних та антикорозійних властивостей епоксидних матеріалів, що застосовуються для покриття та захисту металевих конструкцій (особливо в галузі залізничного транспорту, мостобудування, промислових споруд). Аналіз методів нанесення епоксидних покриттів на металеві конструкції, а також оцінка їх економічної ефективності. Розробка рекомендацій щодо вибору та застосування епоксидних захисних покриттів для несінних металоконструкцій засобів залізничного транспорту.

Ключові слова: *транспортна механіка, перевезення, вагони, рухомий склад, промисловість, автоматизація, ремонт, експлуатація, надійність*

Вступ. Актуальність наукового визначення перспектив застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту зумовлена необхідністю забезпечення безпеки, довговічності та економічної ефективності залізничного транспорту. Несівні металоконструкції засобів залізничного транспорту, особливо в умовах підвищеної вологості та агресивного середовища, схильні до інтенсивної корозії, що знижує їх міцність і надійність, створюючи ризики аварійних ситуацій. Епоксидні покриття,

відомі своєю високою стійкістю до корозії, можуть значно подовжити термін служби вагонів, зменшити витрати на ремонт і заміну, а також забезпечити довготривалий захист, знижуючи необхідність частого повторного фарбування. Це особливо важливо для вагонів, що використовуються для перевезення небезпечних вантажів або пасажирів, де надійність конструкцій є критично важливою. Сучасні епоксидні покриття розробляються з урахуванням екологічних вимог, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище, а використання нанотехнологій відкриває нові перспективи для створення покриттів з покращеними властивостями. Дослідження також дозволять визначити оптимальні типи покриттів для різних типів засобів залізничного транспорту та умов їх експлуатації, адаптуючи їх до специфічних умов, таких як арктичний клімат або морські перевезення. Відповідність нормативним вимогам до безпеки та довговічності залізничного транспорту є обов'язковою умовою для експлуатації вагонів, що робить наукове визначення перспектив застосування епоксидного захисного покриття актуальною та важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття [1] аналізує ринок вагонобудування України, зосереджуючись на конкурентоспроможності підприємств у контексті світового ринку та країн СНД, однак, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховані сучасні економічні та політичні фактори. Попри це, робота корисна для розуміння загальних тенденцій ринку, але потребує доповнення практичним застосуванням досліджень для більш повної картини.

У статті [2] детально описуються властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки. Також аналізуються різні методи нанесення цих покриттів на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Робота [3] пропонує теоретичну модель оцінки конкурентної позиції машинобудівних підприємств, що корисна для розуміння теоретичних аспектів конкурентоспроможності. Однак, робота не містить практичного застосування запропонованої моделі, що обмежує її цінність для реальних бізнес-ситуацій. Крім того, стаття потребує доповнення сучасними дослідженнями, щоб відобразити зміни ринку та економічні фактори, що відбулися з моменту її публікації.

Публікація [4] детально описує властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки, а також аналізує різні методи їх нанесення на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Стаття [5] детально описує властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки, а також аналізує різні методи їх нанесення на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Автори статті [6] року аналізує вплив фінансово-економічної кризи 2008 року на залізничний транспорт України, детально розглядаючи конкретні аспекти впливу. Хоча робота корисна для розуміння загальних тенденцій впливу кризових явищ на транспортну галузь, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховує сучасні кризові явища. Тому, для повної картини, необхідний сучасний аналіз впливу поточних економічних та політичних факторів на залізничний транспорт України

Стаття [7] фокусується на визначенні ефективності реалізації потенціалу конкурентоспроможності вагонобудівних підприємств, пропонуючи методи оцінки. Хоча дослідження має відносно сучасний аналіз та корисне для розуміння теоретичних аспектів конкурентоспроможності, воно має теоретичний характер. Тому, для повної картини, необхідне практичне застосування запропонованої моделі, щоб оцінити її ефективність у реальних бізнес-ситуаціях.

Стаття [8] детально розглядає властивості та методи нанесення захисних покриттів, аналізуючи їх переваги та недоліки. Однак, на жаль, в публікації не приділено достатньої уваги перспективам застосування цих покриттів для несівних металоконструкцій засобів транспорту, що обмежує розуміння їх

потенціалу. Отже, необхідні додаткові дослідження для поглибленого вивчення цього аспекту.

Дослідження [9] розглядає підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу на залізничному транспорті, аналізуючи систему ремонтних підприємств галузі. Хоча робота корисна для розуміння теоретичних аспектів управління, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховує сучасні технології та зміни в галузі. Тому, для повної картини, необхідне практичне застосування запропонованої моделі, щоб оцінити її ефективність у реальних бізнес-ситуаціях, а також сучасні дослідження.

Наукова стаття [10] досліджує вплив графена та його похідних на антикорозійні властивості водорозчинних поліуретанових покриттів, проводячи експериментальне дослідження. Хоча робота має науковий характер і буде корисна для матеріалознавців, її актуальність може бути обмежена через відсутність аналізу впливу сучасних технологій, що швидко розвиваються. Тому, для повної картини, необхідні сучасні дослідження, які б враховували останні досягнення в цій галузі.

Ця стаття [11], опублікована у 2023 році, присвячена дослідженню сучасних методів випробування лакофарбових покриттів на стійкість до корозії. Автори надають детальний аналіз сучасних методів випробувань, що має велике практичне значення для галузей, де використовуються лакофарбові покриття. Науковий характер робить її цінним ресурсом для фахівців у цій галузі.

Стаття [12], представлена на міжнародній конференції IEEE у 2018 році, розглядає розробку структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивів та оцінює якість її роботи. Вона описує сучасні технології, що використовуються в цій системі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з автоматизацією транспорту, що робить її цінною для фахівців у цій галузі.

Стаття [13] 2024 року, опублікована в журналі Renewable Energy, досліджує використання біопалива в морських дизельних двигунах з метою забезпечення сталого та безпечного морського транспорту. Вона описує сучасні технології, що застосовуються в цій галузі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з екологічністю транспорту, що робить її актуальною та цінною для фахівців у цій сфері.

Стаття [14] в науковому віснику Національного гірничого університету, присвячена теоретичному та практичному визначенню параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії підземного рухомого складу. Вона описує сучасні технології, що застосовуються в цій галузі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з автоматизацією транспорту, зокрема підземного, що робить її актуальною та цінною для фахівців у цій сфері.

Робота [15] детально розглядає властивості та методи нанесення захисних покриттів, аналізуючи їхні переваги та недоліки. Однак, на жаль, у публікації не приділено достатньої уваги перспективам застосування цих покриттів для несівних металоконструкцій засобів транспорту, що обмежує розуміння їхнього потенціалу. Отже, необхідні додаткові дослідження для поглибленого вивчення цього аспекту.

Наукова стаття [16], опублікована у 2024 році, присвячена дослідженню новітніх технологій в екологічно безпечних полімерних покриттях. Автори надають детальний аналіз сучасних технологій та перспектив розвитку цієї галузі. Стаття має велике практичне значення для галузей, де використовуються полімерні покриття, та відрізняється науковим характером.

Наукова публікація [17], виконана у 2022 році в журналі «J. Mar. Sci. Eng.», присвячена забезпеченню екологічної безпеки бурових суден під час їх роботи в особливих екологічних районах Північної Європи. Автори описують сучасні технології, спрямовані на підвищення екологічності морського транспорту. Стаття має науковий характер і висвітлює важливі питання, пов'язані з екологічною безпекою морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій виявляє недостатню увагу до перспектив застосування епоксидних захисних покриттів для металоконструкцій залізничного транспорту. Необхідно провести більш глибокі дослідження для визначення оптимальних складів та методів нанесення епоксидних покриттів. Важливо врахувати специфічні умови експлуатації залізничного транспорту, такі як вібрація, температурні коливання та вплив агресивних середовищ. Це також дозволить зменшити витрати на ремонт та обслуговування залізничного транспорту.

Подальші дослідження в цій галузі є важливими для забезпечення безпеки та ефективності залізничних перевезень.

Мета. Мета науково-прикладної статті полягає у дослідженні можливостей та ефективності використання епоксидних матеріалів для підвищення довговічності та надійності металевих конструкцій, що експлуатуються в умовах залізничного транспорту.

Задачі для досягнення поставленої мети:

– аналіз існуючих технологій захисту металевих конструкцій залізничного транспорту від корозії та інших негативних впливів;

– дослідження властивостей епоксидних матеріалів, їх переваг та недоліків у порівнянні з іншими типами захисних покриттів;

– вивчення впливу факторів експлуатації залізничного транспорту (вібрації, температурні коливання, агресивне середовище) на довговічність епоксидних покриттів;

– аналіз методів нанесення епоксидних покриттів на металеві конструкції, а також оцінка їх економічної ефективності;

– розробка рекомендацій щодо вибору та застосування епоксидних захисних покриттів для несінних металоконструкцій засобів залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Епоксидні смоли – це група термореактивних полімерів, які після затвердіння утворюють міцний, хімічно стійкий та довговічний матеріал. Вони використовуються в промисловості, будівництві, автомобілебудуванні, авіації, суднобудуванні та багатьох інших галузях. Характеризуються наявністю однієї або більше гліцидильних чи епоксидних функціональних груп у своїй молекулярній структурі. У немодифікованому стані вони проявляють термопластичні властивості. Смоли демонструють розчинність в ацетоні та інших органічних розчинниках, а також стабільність при тривалому зберіганні. Однак, при ініціюванні реакції з затверджувачами, відбувається процес полімеризації, що призводить до формування тривимірної полімерної сітки без виділення низькомолекулярних побічних продуктів.

Модифікація епоксидних смол може бути досягнута шляхом введення фенольно-альдегідних, кремнійорганічних та інших полімерів, а також жирних кислот рослинних олій. Включення останніх призводить до синтезу еластичних полімерів, а при високих концентраціях – до утворення маслорозчинних смол, придатних для використання у виробництві друкарських та офсетних фарб.

Введення наповнювачів у епоксидні смоли сприяє покращенню механічних та термічних властивостей, таких як твердість та теплостійкість, а також зменшенню усадки та вартості кінцевого матеріалу. Використання армуючих наповнювачів, зокрема волокон та тканин, дозволяє створювати високоміцні композиційні матеріали.

Епоксидні смоли широко застосовуються як захисні покриття та адгезиви для різноманітних матеріалів, включаючи сталь, алюміній, деревину та непористі субстрати. Вони також використовуються як зв'язуючі речовини для текстильних матеріалів, покращуючи їх експлуатаційні характеристики. Епоксидні смоли є ключовими компонентами у виробництві лакофарбових матеріалів для суднобудування, авіабудування, нафтопереробної, машинобудівної, будівельної та харчової промисловості. Окремо слід відзначити їх застосування у створенні наливних епоксидних підлог, що забезпечують естетичний зовнішній вигляд, легкість обслуговування та стійкість до механічних та хімічних впливів.

Епоксидні ґрунти, що базуються на епоксидних смолах, використовуються для захисту металевих поверхонь від корозії завдяки їх здатності формувати щільну та міцну захисну плівку.

Епоксидні смоли є двокомпонентними термореактивними полімерами, що при змішуванні з затверджувачами утворюють жорсткі, але міцні матеріали. Вони використовуються у виробництві ювелірних виробів, ремонті транспортних засобів, суднобудуванні та будівництві.

Узагальнюючи, епоксидні смоли є універсальними полімерними матеріалами з широким спектром застосування завдяки їх високій міцності, хімічній стійкості та адгезійним властивостям. Для затвердіння епоксидних смол необхідні реакційноздатні сполуки, і вибір затверджувача залежить від необхідних умов затвердіння. У 1995 році світове споживання епоксидних смол для виробництва покриттів склало 700 тис. тонн.

Епоксидні ґрунтовки широко використовуються для захисту металоконструкцій у промислових умовах, включаючи мости, нафтогазове обладнання та морські споруди. Для цих цілей часто використовуються високонаповнені епоксидні

ґрунтовки, здатні створювати покриття товщиною до 240 мікрон за один шар.

Застосування епоксидних смол у композитних матеріалах:

Епоксидна смола є основним компонентом у виробництві композитів, зокрема склопластиків та вуглепластиків, виконуючи функцію зв'язуючого агента між волокнистим наповнювачем і матрицею. Це забезпечує формування легких, але високоміцних конструкцій, широко використовуваних у авіаційній, автомобільній та суднобудівній галузях. Наприклад, композитні корпуси літаків і автомобілів, модифіковані епоксидними смолами, демонструють оптимальне співвідношення міцності та маси, що підвищує їх експлуатаційні показники та енергоефективність. Аналогічні матеріали застосовуються у виробництві спортивного інвентарю (гоночні велосипеди, тенісні ракетки), де критичними параметрами є мінімізація ваги при збереженні механічної стійкості.

Класифікація епоксидних смол за хімічною структурою:

Бісфенольні А смоли – продукт конденсації бісфенолу А з епіхлоргідрином. Їх фізико-хімічні властивості (молекулярна маса, в'язкість, температура плавлення) залежать від співвідношення реагентів. Низькомолекулярні форми – рідини, середньомолекулярні – тверді речовини. Смоли з високою молекулярною масою використовуються для фізично-висихаючих покриттів (наприклад, ґрунтовок), оскільки містять переважно гідроксильні групи, які реагують з ізоціанатами або аміносмолами.

Бісфенольні Ф смоли – синтезуються з бісфенолу Ф (похідне фенолу та формальдегіду) та епіхлоргідрину. Вони мають нижчу в'язкість і вищу епоксидну функціональність порівняно з бісфенольними А аналогами. Покриття на їх основі відрізняються підвищеною стійкістю до розчинників та УФ-опромінення.

Епоксидні новолаки – отримують з новолачних смол (фенол/формальдегід). Високий ступінь функціональності (2,2–5,8) забезпечує щільну сітку зшивання, що підвищує термостійкість і хімічну інертність. Однак такі покриття менш еластичні й мають нижчу адгезію до металів.

Аліфатичні епоксидні сполуки (наприклад, епоксидовані спирти) використовуються як реактивні розріджувачі або пластифікатори. Вони демонструють кращу колірну стабільність, але поступаються ароматичним смолам у стійкості до кислот.

Епоксидні емалі та ґрунти

Епоксидна емаль і епоксидна ґрунтовка є захисними покриттями на основі епоксидних смол, але вони виконують різні функції в системі покриттів.

Епоксидна емаль – композитний матеріал на основі смоли, що формує міцне, гладке покриття з високою адгезією до різних субстратів (метал, бетон, дерево). Її універсальність обумовлює застосування як у промисловості, так і в побуті.

Епоксидний ґрунт – спеціалізований матеріал для захисту металевих поверхонь, особливо в автомобілебудуванні. Він забезпечує антикорозійний бар'єр і покращує адгезію фарбувальних систем. На (рис.1) кузов вантажного напіввагону покритий епоксидною ґрунтовкою.

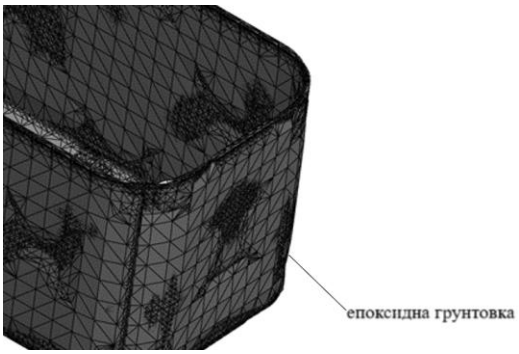

Рис. 1. Напіввагон покритий епоксидною ґрунтовкою

Ці матеріали є ключовими у сучасних технологіях завдяки поєднанню механічної міцності, хімічної стійкості та адаптивності до різних умов експлуатації.

Основні причини його використання епоксидної ґрунтовки:

Захист від корозії: Завдяки своїй щільній структурі та стійкості до проникнення рідини, епоксидний ґрунт створює надійний бар'єр, що запобігає розвитку корозії на металевих поверхнях автомобіля.

Первинна обробка: Епоксидний ґрунт часто застосовується при первинній обробці автомобіля, забезпечуючи міцну основу для всієї лакофарбової системи.

Адгезія: Він забезпечує відмінну адгезію між металевою поверхнею та наступними шарами фарби та лаку, що підвищує довговічність покриття.

Вирівнювання поверхні: Хоча епоксидний ґрунт не вимагає шліфування, він допомагає

згладити дрібні нерівності поверхні, створюючи рівну основу для фарбування.

Універсальність: Епоксидний ґрунт можна використовувати на різних металевих поверхнях, що робить його універсальним рішенням для різних завдань автомобільної індустрії.

Хімічна стійкість: Він має високу стійкість до різних хімічних речовин, що додатково захищає кузов автомобіля від агресивних зовнішніх впливів.

Довговічність: Застосування епоксидного ґрунту значно збільшує термін служби лакофарбового покриття автомобіля.

На ринку представлено безліч марок епоксидних ґрунтовок, кожна з яких має свої особливості та переваги. Наприклад, APP GRUND EP 3:1 є універсальним ґрунтом для автомобільного ремонту, тоді як APP PRIMER EP 30-620 Grey 4:1 призначений для промислового застосування з можливістю нанесення товстих шарів.

Таким чином, епоксидний ґрунт є найважливішим компонентом у процесі захисту та підготовки металевих поверхонь автомобіля, забезпечуючи надійну основу для довговічного та якісного лакофарбового покриття.

Епоксидні емалі та інші хімстійки лакофарбові матеріали, активно використовуються в промисловості для обробки котлів, підлог, деталей різних механізмів, проводки, обмотки і багато чого іншого. Це робиться для додання оброблюваним агрегатів і елементів конструкцій стійкості до корозії, підвищення гідроізоляційних і електроізоляційних якостей. Також емалями покриваються деталі, які піддаються регулярному і тривалому нагріванню або постійно контактують з агресивними хімічними речовинами. Є як універсальні, так і вузьконаправлені склади. На (рис.2) кузов вантажного напіввагону покритий епоксидною емаллю.

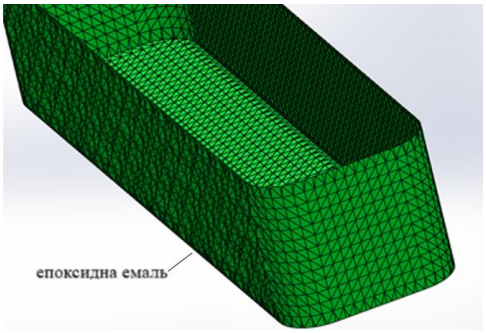

Рис. 2. Напіввагон покритий епоксидною емаллю

Незважаючи на те, що кожний окремий різновид епоксидної емалі має деякі відмінності за способом застосування, умовно всі ЛКМ можна розділити на два типу: висихання і повне затвердіння плівки відбувається природним шляхом; повне затвердіння покриття вимагає штучної сушки.

Вибір між цими двома варіантами дуже важливий, адже в ряді ситуацій (причому як в побуті, так і в промисловості) висушити виріб штучно може бути дорого, незручно, або й зовсім неможливо. Приміром, дорожню розмітку слід проводити тільки за допомогою лакофарбових матеріалів, що висихають природним шляхом і не мають жорстких обмежень за робочої температури і рівня вологості в момент нанесення.

У більшості випадків, епоксидні емалі універсальні, якщо справа стосується способу нанесення. Майже всі лакофарбові матеріали такого роду легко наносяться як валиком або пензлем, так і фарборозпилювачем. Покриття досить ефективно і в один шар, але для досягнення найкращих результатів, рекомендується нанесення хімстійких епоксидних емалей в два або три шари.

Епоксидні покриття – це захисні покриття від корозії металевих виробів за допомогою епоксидних смол. Більшість ринку епоксидних покриттів складає антикорозійне покриття **труб**, які використовуються як для трубопроводів, так і для влаштування фундаментів на трубчастих палі. Прикладом такої споруди є міст (рис. 3).

Рис. 3. Сучасний міст

Найбільшими елементами мосту є центральні прольоти над фарватером. Відповідно, в першу чергу потрібно убезпечити їх від можливих дій ворогів. Нагадаю: довжина арок 227 метрів і важить конструкція 5,5 тисячі тонн.

Опори центральної арки мають дуже потужну пальову основу: 110 паль завтовшки 1,5 метра заповнених армованим бетоном. На додаток палі розташовані під кутом і по суті

утворюють конус-найміцнішу фігуру. У конуса немає слабких місць і неважливо з якого боку йде руйнівний вплив. Підходи до опор центральної арки додатково захищені потужними палами.

Захист трубчастих свай від корозії епоксидними покриттями

Трубчасті палі з антикорозійним покриттям з епоксидних смол для фундаментів застосовуються досить часто, практика показує дуже високу стійкість покриття до здирання, оскільки воно не відривається при зануренні пали в ґрунт та при її вилученні під час демонтажу тимчасових конструкцій.

Приклади епоксидних покриттів – порошки двох сортів Scotchkote 8352N та Scotchkote 226N, вироблені американською корпорацією 3M, використовуються також аналогічні порошки Resicoat R-726A та Resicoat R-641 від голландської корпорації AkzoNobel. Контролером якості сертифіката надійності покриття є шотландська компанія Exova. Розглянемо основні відмінності епоксидної емалі та епоксидної ґрунтовки (табл.)

Таблиця

Основні відмінності епоксидних покриттів

Характеристика	Епоксидна емаль	Епоксидна ґрунтовка
Функція	Декоративне та захисне фінішне покриття	Основа для фінішного покриття, адгезія до поверхні
Склад	Епоксидна смола + пігменти + розчинники	Епоксидна смола + антикорозійні добавки + наповнювачі
Колір	Може бути будь-якого кольору	Зазвичай сірий, червоний, білий
Товщина шару	50 – 200 мкм	30 – 100 мкм
Захист	Стійкість до стирання, механічних і хімічних впливів	Захист від корозії, покращення адгезії
Застосування	Фінішний шар для металу, бетону, дерева	Базовий шар перед нанесенням емалі
Час висихання	8–24 години	4–12 годин

Технологія нанесення епоксидних покриттів трубчастих свай

1. Спочатку в печі трубу нагрівають до 60°C для осушення та подальшої підготовки до хромування, для якого необхідна гаряча труба.

2. Потім поверхню труби очищається струменями піску в дробоструминній установці.

3. Після цього виконується процес хромування, який полягає у нанесенні біхромату калію на гарячу трубу. Хромове покриття має високі антикорозійні властивості, але основне призначення його в іншому - це захист основного полімерного шару від «катодного відшаровування» і збереження адгезії (прилипання) покриття, навіть якщо окремі молекули води проникли через полімерний шар. Катодне відшарування – це комплексний електрохімічний процес, пов'язаний з електролітичною появою бульбашок водню на поверхні металу з втратою надійного контакту з полімерною плівкою. За високої різниці потенціалів катодне відшарування може стати суттєвою проблемою. Відшаровування може досягати 3 мм, щоправда, без розриву покриття. Шар хрому запобігає цьому електрохімічному процесу, змінюючи електричні потенціали лежить на поверхні рахунок гальванічної пари хрому із залізом. Додатково хромування забезпечує високе зчеплення із полімерами, навіть якщо вони частково просочилися водою.

4. Далі на трубу наноситься двошарове порошкове покриття [13] з епоксидних смол. Порошок розплавляється за температури 270°C і утворює полімерні плівки.

5. Перший шар епоксидних смол (праймер) створений із порошку Scotchkote 226N або його аналога Resicoat R-726 та адаптований для хімічного бар'єру та прилипання до труби за рахунок адгезії. Шар створений за технологією завтовшки з 300-400 мк. Найтонше і рівне нанесення порошку до гелеутворення плівки здійснюється за рахунок технології без участі людини з електростатичним прилипанням до труби частинок порошку, що парять. Для цього порошок компресорами перетворюють на аерозвісь і проганяють через електрод під напругою 40.000-120.000 вольт. Далі заряджені частинки починають притягуватися до заземленої труби і осідаючи на ній, починають відштовхувати інші частинки, що забезпечує тонкий і рівномірний шар.

6. Другий шар адаптований проти зовнішніх механічних пошкоджень за рахунок епоксидних смол із порошку Scotchkote 8352N або його аналога Resicoat R-641, що робить

покриття стійким до сколів, ударів, стирання. У дешевому варіанті технології зазвичай цей шар виконують із поліетилену з підсумковою товщиною покриття близько 2-3 мм. У разі Керченського мосту використовується другий шар із епоксидної смоли з товщиною 400 – 600 мк. Незважаючи на меншу товщину, епоксидні смоли стійкіші до здирання і, крім того, не володіють, на відміну від поліетилену, помітною водопроникністю під осмотичним тиском.

7. Далі труба вивчається електроіскровим дефектоскопом «Крона-С», який виявляє мінімальні дефекти: труба обертається під електродом дефектоскопа, і якщо товщина полімеру зменшена, то крізь нього станеться іскровою пробою, і дефект буде виявлено. Потім труба вивчається по всій довжині томографом на ультразвуковій фазованій решітці (УЗФР) для пошуку дефектів у глибині металу, особливо в місцях зварювання. Контроль якості нанесення покриття здійснюють експерти світового лідера сертифікації антикорозійних покриттів із шотландської компанії Exova. Процедура контролю якості такого епоксидного покриття регулюється також ДСТУ ISO 21809-2-2013, що дозволяє виконувати також державний контроль за якістю покриття та регламентує процедури та технологію усунення виявлених дефектів.

Висновки. Епоксидні смоли – це основний компонент епоксидної емалі та епоксидної ґрунтовки, але самі по собі вони не є готовими фарбувальними матеріалами.

Епоксидний ґрунт є сучасним і ефективним рішенням для захисту металоконструкцій від корозії. Його унікальні властивості, універсальність застосування та постійні інновації в галузі розробки роблять його незамінним матеріалом як для професійних автомеханіків, так і для промислових підприємств.

Інвестуючи в якісний захист з використанням епоксидного ґрунту, ви не тільки продовжуєте термін служби вашого автомобіля чи обладнання, а й заощаджуєте значні кошти на майбутніх ремонтах. У світі, де кожна деталь має значення, вибір правильного ґрунту може стати вирішальним фактором у боротьбі з корозією та збереженні цінності металоконструкції у машинобудуванні.

Епоксидні смоли є надзвичайно універсальними матеріалами, що знаходять застосування в багатьох галузях, включаючи машинобудування.

Епоксидні ґрунти та покриття ефективно захищають металеві поверхні від корозії завдяки своїй щільній структурі та стійкості до проникнення рідини.

Епоксидні смоли забезпечують відмінну адгезію між різними матеріалами, що робить їх ідеальними для використання в якості клеїв та сполучних речовин.

Епоксидні покриття мають високу стійкість до різних хімічних речовин, включаючи луги, кислоти, солі та розчинники, що робить їх придатними для використання в агресивних середовищах.

Епоксидні смоли використовуються як сполучні речовини у виробництві композитних матеріалів, таких як склопластик та вуглепластик, що дозволяє створювати легкі та міцні конструкції.

Технологія нанесення епоксидних покриттів включає кілька етапів, включаючи нагрівання, очищення, хромування та нанесення порошкового покриття, що забезпечує високу якість та довговічність покриття.

Типи епоксидних смол: Існує кілька типів епоксидних смол, включаючи бісфенольні А, бісфенольні Ф, епоксидні новолаки та аліфатичні епоксидні сполуки, кожна з яких має свої унікальні властивості та застосування.

Епоксидні емалі є універсальними лакофарбовими матеріалами, які забезпечують міцне та довговічне покриття на різних поверхнях, включаючи метал.

Контроль якості епоксидних покриттів є важливим етапом, який включає використання дефектоскопів та томографів для виявлення дефектів та забезпечення високої якості покриття.

Література

1. Посохов І. М. Дослідження ринку вагонобудування України та конкурентоспроможності промислових підприємств залізничного транспорту на світовому ринку та ринку країн СНД. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*: зб. наук. пр. Темат. вип.: Технічний прогрес та ефективність виробництва. Харків. 2015. № 60 (1169). С. 115-118.
2. Бараш Ю.С., Корженевич І.П., Мельянцова Ю.П. Вплив фінансово-економічної кризи на діяльність залізничного транспорту України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна*. 2009. Вип. 29. С. 212-220.
3. Квятковська Л.А., Кулінічев П.К. Формування моделі оцінки конкурентної позиції

машинобудівного підприємства. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2014. Випуск 6 (Ч. 2). С.183-188.
4. Соляник Л.Г., Дубєй Ю.В. *Оборотні активи машинобудівних підприємств: процеси відтворення й оптимізації структури*: монографія / за ред. Л.Г. Соляник. Д. : НГУ, 2015. С. 391.
5. Отенко І.П., Полтавська Є.О.. *Управління конкурентними перевагами підприємства.* ХНЕУ, 2005. С. 212.
6. Бараш Ю.С., Корженевич І.П., Мельянцова Ю.П. Вплив фінансовоекономічної кризи на діяльність залізничного транспорту України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна.* 2009. Вип. 29. С. 212-220.
7. Дикань В. Л., Обруч Г. В. Визначення ефективності реалізації потенціалу конкурентоспроможності вагонобудівних підприємств. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. Вип. 56. С. 9-18.
8. Каличева Н.Є. Організація управління на підприємствах залізничного транспорту в сучасних умовах. *Вісник економіки транспорту і промисловості.* Збір наук. праць. Харків, УкрДАЗТ. 2014. № 45. С. 167-170.
9. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.* Луганск. 2006. С. 219-223.
10. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. *Composites Science and Technology.P. 30-37.2016.doi:*https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017
11. Павленко В. М.. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2023. №2 (18). С. 127–133. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133
12. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS).* Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Píštěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy.* 2024. 120221 ISSN 0960-1481 https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221
14. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University.* 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
15. Fomin O. , Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies.* 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
16. Павленко В. М.. Новітні технології в екологічно безпечних полімерних покриттях: дослідження, технології, перспективи. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2024. №1 (19). С. 85–94. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94
17. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Píštěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10, 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331

References

1. Posokhov I. M. Doslidzhennja rynku vaghonobuduvannja Ukrajiny ta konkurentospromozhnosti promyslovykh pidpryjemstv zaliznychnogho transportu na svitovomu rynku ta rynku krajin SND. [*Research on the Railway Car Building Market in Ukraine and the Competitiveness of Industrial Railway Transport Enterprises in the Global Market and the CIS Countries Market*.] *Bulletin of the National Technical University "KhPI": Collection of Scientific Papers. Thematic Issue: Technological Progress and Production Efficiency.* Kharkiv, 2015. No. 60 (1169). P. 115–118.
2. Barash Yu. S., Korzhenevych I. P., Melyantsova Yu. P. Vplyv finansovo-ekonomichnoji kryzy na dijaljnistj zaliznychnogho transportu Ukrajiny. [*The Impact of the Financial and Economic Crisis on the Operation of Railway Transport in Ukraine.] Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan.* 2009. Issue 29, P. 212–220.
3. Kvyatkovska L. A., Kulinichev P. K. Formuvannja modeli ocinky konkurentnoji pozyciji mashynobudivnogho pidpryjemstva. [*Development of a Model for Assessing the Competitive Position of a Machine-Building Enterprise.] Scientific Bulletin of Kherson State University.* 2014. Issue 6 (Part 2), P. 183–188.
4. Solyanik L. H., Dubei Yu. V. Oborotni aktyvy mashynobudivnykh pidpryjemstv: procesy vidtvorennja j optymizaciji struktury. [Current Assets of Machine-Building Enterprises: Processes of Reproduction and Structure Optimization]:

Monograph /edited by L. H. Solyanik. Dnipro, 2015. NSU. P. 391.
5. Otenko I. P., Poltavska Ye. O. Upravlinnja konkurentnymy perevaghamy pidpryjemstva. [*Managing the Competitive Advantages of an Enterprise]*. KhNEU. 2005. P. 212.
6. Barash Yu. S., Korzhenevych I. P., Melyantsova Yu. P. Vplyv finansovoekonomichnoji kryzy na dijaljnistj zaliznychnogho transportu Ukrajiny. [*The Impact of the Financial and Economic Crisis on the Operation of Railway Transport in Ukraine.] Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan.* 2009. Issue 29, P. 212–220.
7. Dykany V. L., Obruch H. V. Vyznachennja efektyvnosti realizaciji potencialu konkurentospromozhnosti vaghonobudivnykh pidpryjemstv. [*Assessing the Efficiency of Realizing the Competitive Potential of Railway Car-Building Enterprises.] Bulletin of Transport and Industry Economics.* 2016. Issue 56, P. 9–18.
8. Kalycheva N. Ye. Orghanizacija upravlinnja na pidpryjemstvakh zaliznychnogho transportu v suchasnykh umovakh. [*Organization of Management at Railway Transport Enterprises under Modern Conditions.] Bulletin of Transport and Industry Economics. Collection of Scientific Papers*. Kharkiv: UkrDAZT, 2014. No. 45, P. 167–170.
9. Sosunov N. N. Pidvyshhennja efektyvnosti procesiv ekspluataciji ta tekhnichnogho obslughovuvannja rukhomogho skladu u systemi remontnykh pidpryjemstv ghaluzi. [*Improving the Efficiency of Operation and Maintenance Processes of Rolling Stock within the System of Repair Enterprises in the Industry.] Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl*. Luhansk, 2006. P. 219–223.
10. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. Composites Science and Technology.P. 30-37.2016. doi:https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017
11. Pavlenko V. M. Doslidzhennja metodiv vyprobuvannja lakofarbovogho pokryttja na stijkistj do koroziji. [*Research on Methods of Testing the Durability of Coatings to Corrosion.] Bulletin of Machine Engineering and Transport.* 2023. No. 2 (18), pp. 127–133. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133
12. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Píštěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy.* 2024. 120221 ISSN 0960-1481 https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221
14. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University.* 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
15. Fomin O. , Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies.* 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
16. Pavlenko V. M. Novitni tekhnologhiji v ekologhichno bezpechnykh polimernykh pokryttjakh: doslidzhennja, tekhnologhiji, perspektyvy. [*Modern Technologies in Environmentally Safe Polymer Coatings: Research, Technologies, Prospects.] Bulletin of Machine Engineering and Transport.* 2024. No. 1 (19), P. 85–94. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94
17. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Píštěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10, 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331

Fomin O.V., Kozynka O.S., Krasulin A. S., Sachenok D. S. Analysis of the prospects for the application of epoxy protective coating for load-bearing metal structures of railway transport vehicles

The paper analyzes the prospects of using epoxy protective coatings for load-bearing metal structures in railway transport. Epoxy resins play an important role in protecting, strengthening, and extending the service life of load-bearing metal structures, especially in aggressive environments. Modern epoxy coatings are being developed with environmental standards in mind, reducing their impact on the environment. The use of nanotechnology allows for the creation of coatings with improved properties. The research will help identify the optimal coatings for various types of railway vehicles and operational conditions, such as cold climates or sea transportation. Compliance with safety and durability standards is mandatory for the operation of railway transport, making the study of the potential use of epoxy coatings highly relevant. Epoxy coatings, which provide excellent corrosion protection, can significantly extend the service life of carriages, reduce repair and replacement costs, and minimize the need for frequent repainting. This is especially important for carriages transporting hazardous goods or passengers, where the reliability of the structures is of utmost importance. An analysis of existing technologies for protecting metal structures in railway transport from corrosion and other negative influences

was carried out. Technologies for protecting metal structures in railway transport (wagons, platforms, tankers, trucks, etc.) from corrosion and other negative impacts (mechanical wear, moisture, chemicals, UV radiation, vibrations) were studied. The study of the properties of epoxy materials, their advantages and disadvantages compared to other types of protective coatings, was carried out. The influence of operational factors of railway transport (vibrations, temperature fluctuations, aggressive environments) on the durability of epoxy coatings was also examined. The physicochemical, mechanical, and anticorrosive properties of epoxy materials used for coating and protecting metal structures (particularly in railway transport, bridge construction, and industrial facilities) were analyzed. Methods for applying epoxy coatings to metal structures and the evaluation of their economic efficiency were studied. Recommendations for the selection and application of epoxy protective coatings for load-bearing metal structures in railway transport were developed.

Keywords: *transport mechanics, transportation, carriages, rolling stock, industry, automation, repair, operation, reliability*

Фомін О. В. – д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, fominaleksejviktorovic@gmail.com
Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, kozynka1520mm@gmail.com
Красулін О.С. – старший викладач кафедри «Транспортні технології підприємств» Приазовський державний технічний університет, krasulin2@gmail.com
Саченок Д.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, sachenok_ds@gsuite.duit.edu.ua

Стаття подана 10.03.2025.