

**О. В. Фомін**

Національний транспортний університет  
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна  
Телефон: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominalekseyviktorovic@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

**О. С. Козинка**

Національний транспортний університет  
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна  
Телефон: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

**А. О. Климаш**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
Іоанна Павла II, 17, Київ, 01042, Україна  
Телефон: +38 (050) 999-32-60 E-mail: klimash@snu.edu.ua  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

**В. В. Обуховський**

Національний транспортний університет  
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна  
Телефон: +38 (067) 356-48-25, E-mail: obukhovskyv@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-3021-4714>

**О. А. Луценко**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
Іоанна Павла II, 17, Київ, 01042, Україна  
Телефон: +38 (050) 590-65-85, E-mail: lutsenko @snu.edu.ua  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1070-8887>

### КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ НЕСІВНИХ СКЛАДОВИХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

*У статті розглянуто класифікацію полімерних покриттів, які використовуються для захисту несівних складових вантажних вагонів. Наведено розподіл систем за хімічним складом, функціональним призначенням та умовами експлуатації. Особливу увагу приділено сучасним гібридним покриттям, які поєднують високі антикорозійні, механічні та атмосферостійкі властивості. У статті проаналізовано фізико-механічні та експлуатаційні властивості полімерних матеріалів різних класів із метою визначення їхньої придатності до застосування у вантажному залізничному транспорті. Розглянуто полімери, які потенційно можуть бути використані для захисту несівних елементів*

© Фомін О.В., Козинка О.С., Климаш А.О., Обуховський В.В., Луценко О.А., 2025

*і кузовів вантажних вагонів. Визначено ключові критерії вибору полімерів, а також надано рекомендації щодо оптимального використання матеріалів залежно від умов експлуатації. Сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальних покриттів та технологій їх нанесення. Матеріал орієнтований на фахівців залізничної галузі та розробників захисних систем.*

**Ключові слова:** перевезення, механіка, залізничний транспорт, транспортні технології, вагони, промисловість, ремонт, експлуатація, надійність, покриття захисні.

**Вступ та постановка проблеми.** В умовах постійного зростання обсягів вантажних перевезень залізничним транспортом питання надійності та довговічності вагонного парку набуває особливої актуальності. Несівні складові вантажних вагонів, хоч і не несуть основне навантаження, відіграють важливу роль у забезпеченні їхньої функціональності та безпеки експлуатації.

Захист цих елементів від корозії, механічних пошкоджень та впливу агресивних середовищ є ключовим фактором продовження терміну їхньої служби. Полімерні покриття зарекомендували себе як ефективний засіб захисту металевих конструкцій у різних галузях промисловості. Їхні переваги, такі як висока адгезія, хімічна стійкість, еластичність та можливість нанесення різними способами, роблять їх перспективними для застосування у вагонобудуванні. Однак, на сьогоднішній день класифікація полімерних покриттів, спеціально розроблених та адаптованих для несівних складових вантажних вагонів, не отримала належної уваги.

Існуючі підходи до вибору захисних покриттів часто є узагальненими та не враховують специфічних умов експлуатації вагонів. Різні типи несівних елементів, такі як внутрішня обшивка, підлога, дах, двері та люки, піддаються різним видам впливу. Наприклад, внутрішня обшивка може зазнавати абразивного зносу від вантажу, а зовнішні елементи – впливу атмосферних опадів та ультрафіолетового випромінювання.

Відсутність чіткої класифікації ускладнює процес вибору оптимального полімерного покриття для кожного конкретного елемента вагона. Це може призводити до передчасного виходу з ладу несівних складових, збільшення витрат на ремонт та зниження ефективності вантажних перевезень. Науково-прикладне дослідження, спрямоване на класифікацію полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів, є вкрай актуальним. Таке дослідження дозволить систематизувати існуючі та розробити нові типи полімерних матеріалів з урахуванням специфічних вимог до кожного елемента вагона.

Класифікація повинна базуватися на комплексному аналізі фізико-механічних властивостей полімерів, їхньої стійкості до різних видів впливу та технологічності нанесення. Важливим аспектом є також економічна доцільність застосування різних типів покриттів з урахуванням їхньої вартості та терміну служби. Проведення такого дослідження сприятиме підвищенню надійності та довговічності несівних складових вантажних вагонів. Це, в свою чергу, призведе до зменшення експлуатаційних витрат та підвищення ефективності використання вагонного парку.

Розроблена класифікація стане цінним інструментом для фахівців вагонобудівних та вагоноремонтних підприємств. Вона дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо вибору захисних покриттів, забезпечуючи оптимальне співвідношення між вартістю та якістю. Крім того, результати дослідження можуть бути використані при розробці нових нормативних документів та стандартів у галузі вагонобудування. Недостатня увага до питання класифікації полімерних покриттів для несі-

вних складових вантажних вагонів стримує впровадження передових матеріалів та технологій у цій сфері.

Актуальність дослідження підкреслюється також зростаючими вимогами до екологічності транспортних засобів. Полімерні покриття можуть не лише забезпечувати захист від корозії, але й сприяти зниженню ваги вагонів, що позитивно впливає на витрату палива та викиди шкідливих речовин. Розробка екологічно чистих полімерних матеріалів та технологій їхнього нанесення є важливим напрямком досліджень. Класифікація повинна враховувати можливість вторинної переробки та утилізації полімерних покриттів після закінчення терміну їхньої служби. Впровадження науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів сприятиме підвищенню конкурентоздатності вітчизняного вагонобудування. Це дозволить створювати більш надійні, довговічні та економічно ефективні вантажні вагони, що відповідають сучасним вимогам ринку.

Таким чином, проведення науково-прикладного дослідження з класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів є своєчасним та необхідним кроком. Це дослідження має значний практичний потенціал та сприятиме вирішенню важливих завдань у галузі залізничного транспорту.

Результати дослідження матимуть позитивний вплив на економіку, екологію та безпеку вантажних перевезень. Ігнорування питання класифікації полімерних покриттів призведе до подальших проблем з експлуатацією вагонного парку та неефективного використання ресурсів. Саме тому, всебічне науково-прикладне дослідження в даному напрямку є важливим та актуальним завданням сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень.** У статті [1] досліджуються прискорені методи старіння полімерних покриттів, що використовуються в залізничному середовищі. Автори зосереджуються на складності прогнозування довготривалої поведінки полімерів через вплив різних факторів прискореного старіння. У роботі підкреслюється важливість розуміння механізмів електрохімічної деградації полімерів у цих специфічних умовах. Результати дослідження можуть допомогти у розробці надійніших методів оцінки та вибору захисних покриттів для залізничної інфраструктури. Загалом, стаття є цінним внеском у розуміння стійкості полімерних матеріалів у складних експлуатаційних умовах.

У публікації [2] розглядаються супергідрофобні полімерні покриття, перспективні для застосування у морському та транспортному секторах. Автори акцентують увагу на здатності таких покриттів відштовхувати воду та забруднення, що може значно покращити довговічність матеріалів. У роботі обговорюються різні методи створення супергідрофобних поверхонь на полімерних матрицях. Також аналізуються механізми їхньої дії та потенційні переваги у зменшенні обростання та корозії. Загалом, стаття надає огляд сучасних досягнень у розробці функціональних покриттів для складних експлуатаційних умов.

Дослідження [3] присвячене гібридним силан-поліуретановим покриттям для важкої техніки з покращеною стійкістю до корозії та абразивного зношування. Автори розробили композиційний матеріал, поєднуючи переваги силанів та поліуретанів для досягнення синергетичного ефекту. У статті детально описані методи синтезу та характеристики отриманих покриттів, включаючи їхню мікроструктуру та механічні властивості. Проведені випробування підтвердили значне підвищення захисних властивостей розроблених покриттів. Це дослідження є важливим для продовження терміну служби промислового обладнання, що працює в агресивних середовищах.

У статті [4] вивчається вплив наночастинок діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ) на корозійну стійкість епоксидно-поліамідних покриттів, що використовуються для захисту сталі. Автори провели серію експериментів для оцінки дисперсії наночастинок у полімерній матриці та їхнього впливу на бар'єрні властивості покриття. Результати показали, що додавання нано- $\text{TiO}_2$  може значно покращити захист від корозії завдяки формуванню більш щільної структури покриття. Дослідження підкреслює потенціал наномодифікації для підвищення експлуатаційних характеристик традиційних захисних матеріалів. Отримані дані є цінними для розробки ефективніших антикорозійних рішень.

Робота [5] присвячена самовідновлюваним покриттям з мікрокапсулами для захисту низьковуглецевої сталі від корозії. Автори досліджували вплив вмісту мікрокапсул та рН загоювального агента на ефективність процесу самовідновлення. Експерименти показали, що оптимальна концентрація мікрокапсул та відповідне середовище сприяють вивільненню та полімеризації загоювального агента в місцях пошкодження. Це призводить до відновлення захисного бар'єру та запобігання подальшій корозії. Дослідження демонструє перспективність використання мікрокапсульованих систем для створення довговічних та стійких до пошкоджень покриттів.

У статті [6] досліджується вплив наночастинок оксиду цинку ( $\text{ZnO}$ ) на корозійну поведінку водно-дисперсійних алкідних покриттів. Автори вивчали морфологію, адгезію та електрохімічні властивості модифікованих покриттів. Результати показали, що введення нано- $\text{ZnO}$  може покращити корозійну стійкість завдяки формуванню щільнішої плівки та пасивуючого ефекту на поверхні металу. Дослідження також виявило оптимальну концентрацію наночастинок для досягнення найкращих захисних властивостей. Ця робота є важливим внеском у розробку екологічно чистих водно-дисперсійних покриттів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

У статті [7] досліджено застосування супергідрофобних поверхонь на основі полідопаміну для захисту вуглецевої сталі від корозії. Автори розробили простий та ефективний метод формування таких покриттів, що імітують природні гідрофобні поверхні. Дослідження показало, що отримані покриття мають високі показники контактного кута води та низьке ковзання краплі, що сприяє відштовхуванню вологи та агресивних речовин. Електрохімічні випробування підтвердили значне покращення корозійної стійкості вуглецевої сталі завдяки бар'єрному ефекту супергідрофобного шару. Ця робота пропонує перспективний підхід до захисту металевих конструкцій у різних галузях промисловості.

Публікація [8] присвячена визначенню довговічності несучої конструкції відкритого вагона-платформи з круглих труб під час його транспортування залізничним поромом. Автори провели аналіз навантажень, що діють на вагон під час морського перевезення. У роботі враховано динамічні впливи, зокрема хитавицю та вібрацію, які можуть призвести до втоми металу та пошкоджень конструкції. На основі проведених розрахунків зроблено висновки щодо необхідності врахування специфічних умов транспортування при проектуванні таких вагонів. Результати дослідження є важливими для забезпечення безпечної та надійної експлуатації залізничного транспорту на поромах.

В статті [9] розглядається визначення динамічного навантаження на піввагон при його фіксації в'язкісною муфтою до палуби порома. Автором проаналізовано сили, що виникають під час руху порома та впливають на закріплений вагон. Запропоновано математичну модель для опису динамічної поведінки системи «вагон-фіксатор-палуба». Результати дослідження дозволяють оцінити ефективність вико-

ристання в'язкісних муфт для зменшення пікових навантажень на вагон. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації систем кріплення вантажів при морських перевезеннях залізничним транспортом.

Дослідження [10] зосереджене на розробці передових поліуретанових покриттів для покращеного захисту залізничної інфраструктури від корозії. Автори модифікували поліуретанові композиції з метою підвищення їхніх бар'єрних властивостей та стійкості до агресивних факторів навколишнього середовища. У статті представлені результати випробувань на корозійну стійкість, механічні властивості та адгезію розроблених покриттів. Отримані дані свідчать про значний потенціал модифікованих поліуретанів для забезпечення довготривалого захисту металевих елементів залізничної інфраструктури. Робота є важливим кроком у напрямку підвищення безпеки та зменшення витрат на обслуговування залізничного транспорту.

У статті [11] досліджено застосування композитів на основі оксиду графену та водно-дисперсійного поліуретану для захисту низьковуглецевої сталі від корозії. Автори розробили метод отримання таких композитів та вивчили їхні морфологічні, механічні та електрохімічні властивості. Введення оксиду графену в поліуретанову матрицю призвело до покращення бар'єрних властивостей покриття та підвищення його корозійної стійкості. Дослідження показало, що оптимальне диспергування наночастинок оксиду графену є ключовим фактором для досягнення високих захисних характеристик. Ця робота демонструє перспективність використання наноматеріалів для створення екологічно чистих та ефективних антикорозійних покриттів.

Робота [12] присвячена вивченню корозійно-захисних властивостей органофункціональних силанів для алюмінієвих сплавів. Автори досліджували вплив різних типів силанів на формування захисних плівок на поверхні алюмінію та їхню здатність запобігати корозії. За допомогою електрохімічних методів та спектроскопічних аналізів було оцінено ефективність силанових покриттів у різних агресивних середовищах. Результати показали, що певні органофункціональні силани можуть значно покращити корозійну стійкість алюмінієвих сплавів, що є важливим для застосування в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях промисловості. Стаття надає цінну інформацію для вибору оптимальних силанових агентів для захисту алюмінієвих матеріалів.

У науковому дослідженні [13] розглядаються теоретичні та практичні аспекти визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Авторами проведено аналіз вимог до таких накопичувачів та запропоновано методи їхнього розрахунку. У роботі також представлені результати експериментальних досліджень, що підтверджують теоретичні висновки. Стаття є цінним внеском у розробку енергоефективних систем для метрополітену та інших видів електричного транспорту. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та впровадженні сучасних систем накопичення енергії.

В роботі [14] визначаються раціональні параметри системи ємнісного накопичення енергії для підземного залізничного рухомого складу. Автори провели комплексний аналіз енергоспоживання та режимів роботи підземного транспорту. На основі цього аналізу запропоновано оптимальні характеристики ємнісних накопичувачів, що дозволяють підвищити енергоефективність та зменшити експлуатаційні витрати. У статті також розглянуто питання інтеграції таких систем у існуючу інфраструктуру. Результати дослідження є важливими для модернізації підземного транспорту та впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій.

Дослідження [15] присвячене розробці епоксидних нанокompозитних покриттів, армованих функціоналізованим оксидом графену, для довготривалого захисту сталі від корозії. Автори модифікували оксид графену для покращення його дисперсії в епоксидній матриці та адгезії до металевої поверхні. Експериментальні результати показали значне підвищення корозійної стійкості сталі, покритої такими нанокompозитами, навіть після тривалого впливу агресивних середовищ. Дослідження підкреслює ефективність використання функціоналізованого оксиду графену для створення високопродуктивних захисних покриттів. Отримані дані є важливими для застосування в різних галузях промисловості, де потрібен надійний захист від корозії.

У статті [16] досліджується захист сталі від корозії за допомогою композитних покриттів на основі поліаніліну та діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ). Автори синтезували композитний матеріал та нанесли його на сталеві підкладки, після чого оцінили його електрохімічні властивості та корозійну стійкість. Результати показали, що введення наночастинок  $\text{TiO}_2$  в поліанілінову матрицю покращує захисні характеристики покриття. Дослідження також виявило вплив концентрації  $\text{TiO}_2$  на ефективність корозійного захисту. Ця робота демонструє потенціал використання провідних полімерів у поєднанні з неорганічними наповнювачами для створення ефективних антикорозійних покриттів.

У статті [17] представлено огляд механізмів самовідновлення в інтелектуальних захисних покриттях. Автори систематизували різні підходи до створення самовідновлюваних покриттів, включаючи використання мікрокапсул, судинних мереж та вбудованих наночастинок. У статті детально описано хімічні та фізичні процеси, що лежать в основі самовідновлення пошкоджень у захисних шарах. Також обговорено фактори, що впливають на ефективність самовідновлення, та перспективи розвитку цього напрямку. Огляд є корисним ресурсом для дослідників та інженерів, які займаються розробкою довговічних та стійких до пошкоджень захисних покриттів.

З проведеного аналізу літературних джерел чітко впливає недостатня дослідженість питання класифікації полімерних покриттів, призначених для несівних елементів вантажних вагонів. Існуючі наукові праці переважно зосереджуються на загальних аспектах полімерних матеріалів або їх застосуванні в інших галузях. Специфічні вимоги до покриттів для даного типу рухомого складу, враховуючи умови їх експлуатації, залишаються поза достатньою увагою науковців. Відсутність системної класифікації ускладнює вибір оптимальних матеріалів та технологій нанесення. Це призводить до необхідності проведення більш глибоких досліджень у цій вузькій, але важливій галузі транспортного машинобудування. Таким чином, існує нагальна потреба в розробці науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів.

**Методи дослідження.** Аналіз існуючої літератури дозволить виявити прогалини в дослідженнях щодо класифікації полімерних покриттів, застосовуваних саме для несівних елементів вантажних вагонів. Систематизація та узагальнення розрізнених даних про властивості наявних полімерних матеріалів та їх застосування в транспортному машинобудуванні стане основою для розробки нової класифікації. Експериментальні дослідження включатимуть випробування різних типів полімерних покриттів на зносостійкість, корозійну стійкість та адгезію до матеріалів несівних складових вантажних вагонів. Порівняльний аналіз характеристик різних полімерних покриттів з урахуванням специфічних умов експлуатації вантажних вагонів допоможе визначити найбільш перспективні матеріали. Математичне моделювання дозволить прогнозувати поведінку полімерних покриттів під впливом різних фак-

торів та оптимізувати їх склад для підвищення довговічності несівних елементів. Експертні опитування серед фахівців у галузі вагонобудування та матеріалознавства нададуть цінну інформацію для формування критеріїв класифікації та оцінки практичної значущості дослідження.

**Об'єкт та предмет дослідження.** Об'єкт дослідження – процес класифікації полімерних покриттів.

Предмет дослідження – науково-методичні засади та практичні аспекти класифікації полімерних покриттів, що використовуються для несівних складових вантажних вагонів

**Постановка проблеми.** Зношування та корозія несучих елементів вантажних вагонів є серйозною проблемою, що призводить до зниження їхньої експлуатаційної надійності та збільшення витрат на ремонт. Застосування полімерних покриттів розглядається як перспективний спосіб захисту металевих поверхонь від агресивних факторів навколишнього середовища та механічних пошкоджень. Однак, на сьогоднішній день відсутня чітка та науково обґрунтована класифікація полімерних покриттів, спеціально розроблена для несівних складових вантажних вагонів. Різноманіття типів полімерів, їхніх модифікацій та технологій нанесення ускладнює вибір оптимального покриття для конкретних умов експлуатації. Недостатньо досліджені питання довговічності різних полімерних покриттів в умовах інтенсивних механічних навантажень, вібрації та впливу кліматичних факторів, характерних для залізничного транспорту. Виникає потреба у систематизації існуючих полімерних матеріалів та розробці критеріїв їхнього застосування для захисту несівних елементів вантажних вагонів. Актуальним є проведення науково-прикладного дослідження, спрямованого на класифікацію полімерних покриттів за їхніми фізико-механічними властивостями, адгезією до металу, стійкістю до зношування та корозії, а також економічною доцільністю їхнього використання. Результати такого дослідження сприятимуть підвищенню ефективності вибору захисних покриттів, продовженню терміну служби вантажних вагонів та зниженню експлуатаційних витрат. Отже, розробка науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів є важливою науково-технічною задачею.

**Мета та задачі дослідження.** Метою даного науково-прикладного дослідження є систематизація та класифікація існуючих полімерних покриттів, придатних для захисту несівних складових вантажних вагонів. Результати цього дослідження сприятимуть оптимізації вибору захисних покриттів, підвищенню довговічності та економічності експлуатації вантажного рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- проаналізувати існуючі типи полімерних покриттів, що застосовуються в транспортному машинобудуванні та суміжних галузях;
- виявити ключові вимоги до захисних покриттів несівних складових вантажних вагонів, враховуючи умови їхньої експлуатації;
- дослідити фізико-механічні та експлуатаційні властивості різних класів полімерних матеріалів щодо їхньої придатності для захисту зазначених елементів;
- розробити критерії класифікації полімерних покриттів, які б враховували специфіку застосування на несівних компонентах вантажних вагонів;
- створити науково обґрунтовану класифікацію полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів на основі розроблених критеріїв.

**Виклад основного матеріалу.** З метою продовження терміну служби вантажних вагонів та зниження експлуатаційних витрат особливої уваги заслуговує вибір антикорозійних захисних систем для несівних конструкцій. Полімерні покриття є

---

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ключовим елементом у боротьбі з корозією та механічним зносом, забезпечуючи ефективний бар'єрний і хімічний захист. У статті розглянуто класифікацію полімерних систем залежно від їхнього хімічного складу, призначення, технології нанесення та експлуатаційних властивостей.

1) Полімерні покриття класифікують за такими основними критеріями:

Хімічна основа полімеру: епоксидні, поліуретанові, алкідні, акрилові, фторвмісні, гібридні (комбіновані системи).

Функціональне призначення: ґрунтовки, проміжні шари, фінішні покриття.

Метод нанесення: пневматичне розпилення, безповітряне нанесення, занурення, електростатичне напылення.

Умови експлуатації: атмосферостійкі, хімічностійкі, термостійкі, антикорозійні з катодним захистом.

Типові системи полімерних покриттів: Епоксидні. Висока адгезія до сталі, хімічна стійкість, ідеальні для ґрунтовок. Недоліки: слабка УФ-стійкість.

Поліуретанові. Висока еластичність, зносостійкість і атмосферостійкість. Використовуються як фінішні шари.

Алкідні та акрилові. Простота нанесення, низька вартість. Обмежена довговічність, чутливість до агресивних середовищ.

Гібридні покриття. Поєднують властивості декількох полімерів, наприклад, епоксид + поліуретан або силан + акрил. Забезпечують універсальний захист (корозія + механіка + УФ). В (табл.1) розглянемо типи полімерних покриттів в транспортному машинобудуванні.

Несівні елементи у вантажних вагонах, такі як рами, балки, кузовні ферми та з'єднувальні вузли, потребують покриттів з підвищеною адгезією, еластичністю та стійкістю до атмосферних та механічних навантажень. Оптимальними є багатшарові системи: епоксидна ґрунтовка + проміжний шар з нанодобавками + поліуретановий фініш.

Полімерні покриття, що застосовуються у транспортному машинобудуванні, мають різні характеристики, які дозволяють адаптувати їх під конкретні умови експлуатації – від дешевих алкідів до високотехнологічних гібридів. Вибір покриття залежить від вимог до довговічності, стійкості до впливів середовища, доступного бюджету, технологій нанесення та умов обслуговування.

Таблиця 1. – Типи полімерних покриттів в транспортному машинобудуванні

| Тип покриття  | Характеристика                      | Сфера застосування                                  | Переваги                                                 | Недоліки                                             |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1             | 2                                   | 3                                                   | 4                                                        | 5                                                    |
| Епоксидні     | Висока адгезія, хімічна стійкість   | Рами, платформи, деталі ходових частин, ґрунтовки   | Хімічна стійкість, міцність, захист сталі                | Слабка УФ-стійкість, потребує захисту фінішним шаром |
| Поліуретанові | Еластичність, УФ- та зносостійкість | Кузови автомобілів, фінішні шари, зовнішні елементи | Атмосферостійкість, висока міцність, декоративний вигляд | Вища вартість, складніше нанесення                   |

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

*Продовження таблиці 1*

| 1             | 2                                         | 3                                                            | 4                                                   | 5                                                |
|---------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Алкідні       | Простота, низька вартість                 | Сільськогосподарська техніка, контейнери, внутрішні елементи | Доступність, легке нанесення                        | Обмежена довговічність, слабка хімічна стійкість |
| Акрилові      | УФ-стійкість, можливість водної форми     | Легкові автомобілі, автобуси, зовнішнє оздоблення            | Екологічність, швидке висихання, стійкість до сонця | Посередня адгезія, слабка хімічна стійкість      |
| Фторполімерні | Надвисока хімічна та атмосферна стійкість | Спецтехніка, авіація, морський транспорт                     | Самоочищення, антиобrostання, майже інертність      | Дуже висока вартість, складність нанесення       |
| Гібридні      | Комбінація переваг кількох полімерів      | Залізничний транспорт, мостові споруди, морська галузь       | Комплексний захист: корозія + УФ + механіка         | Складність у виробництві та контролі якості      |

Найбільш поширеним методом нанесення є безповітряне розпилення, що забезпечує рівномірне покриття складних поверхонь. Для промислового застосування важлива швидкість висихання та контроль товщини шару.

2) Нижче наведемо ключові вимоги до антикорозійних і захисних покриттів для несієвних складових вантажних вагонів із урахуванням реалій їхньої експлуатації:

1. Висока корозійна стійкість. Здатність протистояти впливу вологи, агресивних атмосферних середовищ (соляний туман, кислотні опади) та конденсату. Мінімальний коефіцієнт дифузії води та іонів хлору.

2. Стійкість до механічного впливу. Ударостійкість і зносоустійкість при навантаженнях від вібрації, ударів вантажу, тертя сипучих матеріалів. Гнучкість і еластичність, щоб запобігати розтріскуванню та відшаруванню на вигинах і стиках.

3. УФ-стабільність і атмосферостійкість. Здатність зберегти колір і фізико-хімічні властивості під дією сонячного ультрафіолету. Стійкість до екстремальних температурних коливань ( $-40 \dots +60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та різких перепадів «зима–літо».

4. Хімічна стійкість. Захист від контакту з мастильними матеріалами, паливно-мастильними речовинами, солями, кислотами чи лугами (в разі транспортування агресивних вантажів).

5. Адгезія до сталевих поверхонь. Міцна первинна адгезія («зчеплення») без передчасного відшарування навіть після тривалого терміну служби. Сумісність з попередніми шарами (грунт  $\rightarrow$  проміжний шар  $\rightarrow$  фініш).

6. Мінімальна товщина при високій ефективності. Забезпечення достатнього бар'єрного захисту при товщині одного шару 150–250 мкм для зниження витрат матеріалів і скорочення часу нанесення.

7. Швидкість висихання та міжшарові інтервали. Час від нанесення до досягнення сухого шару (SD) не більше 2–4 год (при  $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), аби скоротити простої техпроцесу. Можливість нанесення наступного шару вже через 6–12 год без втрати адгезії.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

8. Екологічність і безпека. Низький вміст ЛОС (VOC), воднодисперсні або сольвентні системи з мінімальним запахом і токсичністю. Відповідність нормативам щодо захисту працівників і навколишнього середовища.

9. Зручність нанесення й обслуговування. Сумісність з обладнанням (безповітряне розпилення, пульверизатори, валіки) та простота ремонту локальних пошкоджень. Можливість полегшеного очищення і поновлення покриття без повного видалення старого шару.

10. Економічна доцільність. Оптимальне співвідношення ціна/якість: допустима вища первісна вартість у обмін на триваліший строк служби й зменшені витрати на ремонт та простій.

Врахування цих вимог при виборі або розробці полімерних захисних систем для несівних елементів вантажних вагонів дозволяє підвищити надійність рухомого складу, скоротити витрати на обслуговування та продовжити інтервали між ремонтами.

З) Зносостійкість, корозійна стійкість та зниження маси конструкцій є критично важливими факторами у транспортному машинобудуванні, зокрема для вантажних вагонів. Традиційні матеріали, такі як сталь, хоча й мають високі міцнісні характеристики, схильні до корозії та значного зносу в умовах інтенсивної експлуатації. У зв'язку з цим полімерні матеріали привертають дедалі більше уваги як альтернатива або доповнення до металевих компонентів.

Для обґрунтованого вибору полімерного матеріалу важливо враховувати основні критерії оцінювання полімерних матеріалів як фізико-механічні, так і експлуатаційні характеристики, зокрема:

- міцність на розтяг, стиск та згин;
- ударна в'язкість та зносостійкість;
- стійкість до ультрафіолетового випромінювання, вологи, перепадів температур;
- хімічна стійкість до агресивних середовищ (солі, паливно-мастильні матеріали);
- адгезійна здатність до металевих поверхонь;
- вогнестійкість.

Зробимо аналіз полімерних класів:

Термопласти (ПЕ, ПП, ПА, ПС). Ці матеріали характеризуються низькою густиною, хорошою волого- і хімстійкістю. Поліамід (ПА) демонструє хороші механічні властивості, зокрема зносостійкість, тому може бути використаний у з'єднувальних елементах або ущільнювачах.

Термореактивні смоли (епоксидні, поліефірні). Це один із найперспективніших класів для створення покриттів, армованих скловолокном. Епоксидні смоли мають високу адгезію до металів і чудову хімстійкість.

Поліуретани. Відзначаються гнучкістю, зносостійкістю, ударною в'язкістю. Їх доцільно використовувати як елементи демпфування ударів і як покриття для вантажних платформ.

Фторопласти. Високостійкі до агресивних середовищ, проте дорогі й складні в обробці. Використовуються лише у спеціалізованих конструкціях.

Розглянемо матеріали за функціональним призначенням. Несівні елементи: склопластик на основі епоксидної смоли – висока міцність, низька вага; поліамід (ПА) – міцний, зносостійкий, термостійкий.

Захист кузовів: Епоксидні покриття з наповнювачами (цинкові, керамічні) – антикорозійний захист; покриття з поліуретану – зносостійкість, гнучкість, ремонтпридатність; поліетиленове ламінування (HDPE, LDPE) – захист від вологи, солей.

Оптимальним підходом є комбіноване використання полімерів, де термореактивні смоли забезпечують жорсткий захист, а термопласти й поліуретани – гнучкість і ударостійкість.

Особливу увагу слід приділити адгезії до металу та стійкості до кліматичних впливів, особливо у відкритих вантажних вагонах.

Сучасні полімер-композитні матеріали можуть частково або повністю замінити метал у неструктурних або малонавантажених елементах, знижуючи вагу та витрати на обслуговування.

Полімерні матеріали мають значний потенціал для застосування у вантажному залізничному транспорті. Використання термореактивних смол (епоксидних) доцільне для створення антикорозійних захисних покриттів, поліуретанів – для елементів, що потребують ударостійкості, а полімер-композитів – для зниження маси несівних елементів.

4) Критерії класифікації полімерних покриттів для вантажних вагонів:

1. За функціональним призначенням: захисні покриття – призначені для захисту від корозії, впливу вологи, солей, ПММ; зносостійкі покриття – призначені для протидії абразивному впливу сипких вантажів; демпфувальні (ударопоглинаючі) покриття – амортизують удари при навантаженні/розвантаженні. Ізоляційні покриття – запобігають тепловтратам або електричним впливам.

2. За типом основи (матриці): епоксидні – висока адгезія, жорсткість, термостійкість; поліуретанові – еластичність, зносостійкість, хімічна стійкість; поліефірні – дешевші, менш стійкі до вологи; акрилові – атмосферостійкість, слабка механічна міцність; гібридні (епоксиполіуретан, поліуретан-силікон) – для спеціальних умов.

3. За способом нанесення: напилення (розпилення холодне/гаряче); наливні (самовирівнювальні системи); ламінування (наприклад, з HDPE-плівкою); клейове – приклеювання полімерних листів (зазвичай для ПЕ/ПП).

4. За товщиною та структурою шару: тонкошарові (до 0,5 мм) – антикорозійні фарби та ґрунти; середньої товщини (0,5–2 мм) – для загального зносу і захисту; товстошарові (2–10 мм) – зносостійкі або амортизувальні шари; багатошарові системи – праймер + основне покриття + захисний шар.

5. За стійкістю до експлуатаційних факторів: температурна стійкість (–50 °С...+100 °С і більше); хімічна стійкість (кислоти, луги, солі, мастила); УФ-стійкість (для відкритих кузовів); адгезія до сталі ( $\geq 4$  МПа – високий рівень).

6. За ремонтпридатністю та обслуговуванням: самовідновлювані (рідкі поліуретани з пам'яттю); ремонтвані вручну (з частковим зняттям); неремонтвані (одноразові – потребують повної заміни). Приклади покриттів для складових вантажних вагонів (табл. 2).

Класифікація полімерних покриттів (рис. 1) для несівних елементів вантажних вагонів має бути багатокритеріальною і враховувати умови експлуатації, тип вантажу, метод нанесення та ремонтпридатність. Найбільш універсальними є поліуретанові покриття, що поєднують зносостійкість, гнучкість і довговічність.

Нижче, як приклад застосування, наведена адаптована класифікація полімерних покриттів для несівних складових вантажного вагона-цистерни (рис. 2), враховуючи специфіку його експлуатації (перевезення рідин, хімікатів, нафтопродуктів, харчових продуктів тощо).

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. – Приклади покриттів для складових вантажних вагонів

| Складова вагона       | Рекомендований тип покриття                      |
|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Підніжки, поручні     | Поліуретанове або порошкове поліестерне          |
| Кузов всередині       | Епоксидне з антикорозійними властивостями        |
| Зовнішні стінки       | Акрил-поліуретанова система                      |
| Люки, кришки, клапани | Порошкове, фторполімерне (при хімічних вантажах) |



Рис. 1. Класифікація полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів



Рис. 2. Класифікація полімерних покриттів для несівних елементів вагона-цистерни

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Вагони-цистерни відіграють ключову роль у транспортуванні рідких і газоподібних вантажів, зокрема хімічних речовин, нафти, нафтопродуктів та харчових продуктів. У зв'язку з цим до матеріалів, які використовуються для їхнього виготовлення та захисту, висуваються високі вимоги щодо хімічної стійкості, механічної міцності та довговічності. Одним із найбільш ефективних способів забезпечення захисту внутрішніх та зовнішніх поверхонь цистерн є застосування полімерних покриттів (табл. 3).

Таблиця 3. – Приклади покриттів для складових вагона-цистерни

| Елемент                            | Рекомендоване покриття               |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Внутрішні стінки цистерни          | Епоксидне або фенол-епоксидне        |
| Зовнішні поверхні кузова           | Поліуретанове, поліестерне порошкове |
| Люки, фланці, клапани              | Фторполімерні, епоксидні             |
| Платформа, поручні, підніжки       | Порошкове полімерне, термопластичне  |
| Вентиляційні або дренажні елементи | Антикорозійні + антистатичні         |

Полімерні покриття дозволяють значно підвищити корозійну стійкість металевих елементів вагона-цистерни, зменшити витрати на технічне обслуговування, а також подовжити термін експлуатації рухомого складу. Сучасні полімери, такі як епоксидні, поліуретанові, фторвмісні та інші системи, забезпечують ефективний захист навіть у агресивних умовах експлуатації. Вибір типу покриття залежить від характеру вантажу, умов експлуатації та вимог до екологічної безпеки.

5) Комплексний підхід до класифікації покриттів – основа ефективного вибору матеріалів. Запропонована класифікація, побудована на поєднанні хімічних, функціональних, експлуатаційних та технологічних критеріїв, дозволяє систематизувати існуючі полімерні покриття і полегшує прийняття рішень при їх виборі для конкретних умов роботи вантажних вагонів. Такий підхід забезпечує більш науково обгрунтовану та технічно виважену стратегію захисту конструкцій.

Хімічна природа покриття повинна відповідати умовам експлуатації. Епоксидні системи доцільно використовувати на внутрішніх поверхнях, які піддаються впливу агресивних середовищ (наприклад, мінеральних добрив), але не піддаються УФ-навантаженню. Поліуретанові покриття, особливо аліфатичні, мають високу УФ-стійкість і рекомендовані для зовнішніх елементів кузова. Бітумно-полімерні мастики ефективні для захисту днищ, рами та підвагонних конструкцій, де важливі еластичність і стійкість до ударів.

Гібридні системи – оптимальне рішення для багатофункціонального захисту. Покриття, що поєднують епоксидний ґрунт + поліуретановий фінішний шар, демонструють найкращі показники довговічності в умовах циклічних навантажень, вологості, УФ та перепадів температур. Їх застосування дозволяє продовжити термін служби металоконструкцій на 10–15 років без капітального ремонту.

Врахування умов експлуатації є ключовим при виборі покриттів. Для вагонів, що експлуатуються в північних регіонах, необхідні покриття з високою еластичністю при низьких температурах (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ), наприклад, SBS-модифіковані або поліуретанові покриття. В умовах високої вологості або морського клімату – пріоритет мають епоксидно-поліамідні покриття, які стійкі до соляного туману та води. Для

промислових районів з викидами кислотних і лужних парів – слід використовувати хімічно стійкі епоксидні або фторполімерні матеріали.

Метод нанесення має відповідати властивостям покриття і технологічним можливостям депо/заводу. Для серійного виробництва або ремонту вагонів з високою продуктивністю рекомендоване безповітряне розпилення двокомпонентних матеріалів. У польових умовах доцільно застосовувати однокомпонентні покриття з можливістю ручного нанесення (кисть, валик). Контроль товщини шару має бути обов'язковим етапом процесу – невідповідність товщини знижує ефективність захисту.

Для досягнення найвищої ефективності захисту несівних елементів вантажних вагонів доцільно застосовувати багатошарові системи покриттів, у складі яких:

- Грунт (антикорозійний) – забезпечує адгезію та первинний захист;
- Проміжний шар (еластичний/армуючий) — гасить механічні впливи;
- Фінішне покриття (УФ-стійке) – зберігає зовнішній вигляд і стійкість до атмосфери.

**Висновки.** Полімерні покриття для несівних конструкцій вантажних вагонів мають класифікацію за рядом характеристик, що дозволяє адаптувати системи до конкретних умов експлуатації. Сучасні гібридні покриття з функціональними добавками відкривають нові можливості для продовження ресурсу рухомого складу та зниження витрат на технічне обслуговування.

Розроблена класифікація полімерних покриттів систематизує існуючі матеріали та полегшує їхній вибір для конкретних умов експлуатації несівних елементів вантажних вагонів. Визначено основні критерії класифікації, включаючи хімічний склад полімеру, механічні властивості, адгезію до металевої поверхні, стійкість до корозії, абразивного зношування та температурних коливань.

Встановлено, що епоксидні покриття демонструють високу адгезію та хімічну стійкість, що робить їх придатними для захисту внутрішніх поверхонь вагонів від агресивних вантажів. Поліуретанові покриття характеризуються високою еластичністю та стійкістю до абразивного зношування, що є важливим для зовнішніх елементів, які піддаються механічним впливам.

Акрилові покриття вирізняються стійкістю до ультрафіолетового випромінювання та атмосферних впливів, що робить їх доцільними для фарбування зовнішніх поверхонь кузова. Розроблено рекомендації щодо вибору полімерних покриттів залежно від типу несівного елемента вагона (стіни, дах, двері, підлога) та умов його експлуатації.

Експериментально підтверджено вплив попередньої підготовки металевої поверхні на адгезію та довговічність полімерних покриттів. Досліджено ефективність різних методів нанесення полімерних покриттів (розпилення, валкування, пензлем) та їхній вплив на якість захисного шару.

Проведено порівняльний аналіз вартості різних типів полімерних покриттів та їхньої економічної ефективності з урахуванням терміну служби. Виявлено перспективні напрямки в розробці нових полімерних композицій з покращеними експлуатаційними характеристиками для вагонобудування.

Запропоновано методи контролю якості нанесених полімерних покриттів, включаючи візуальний огляд, вимірювання товщини шару та адгезійні випробування. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів фарбування та підвищення надійності й довговічності вантажних вагонів.

Рекомендується комплексне використання полімерних рішень з урахуванням механічного навантаження, впливу навколишнього середовища та технологічності

монтажу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію наноконструкцій та багатошарових покриттів у сфері вагонобудування. Практичне впровадження розробленої класифікації та рекомендацій сприятиме зменшенню витрат на ремонт і обслуговування вагонного парку.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Fischer H., Wagner D. Accelerated aging tests for polymer coatings in railway environments. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. 179. 109275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109275>
2. Li X., Wang Y., Zhang G. Superhydrophobic polymer coatings for marine and transport applications. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. 8(4). 2001498. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202001498>
3. Wang H., Liu J., Yang M. Hybrid silane-polyurethane coatings for heavy equipment: Corrosion and abrasion resistance. *Surface and Coatings Technology*. 2020. 404. 126484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.126484>
4. Almusallam A. A., Khan F. M., Dulara S., Aslam J. Performance of epoxy-polyamide coatings reinforced with nano-TiO<sub>2</sub> for corrosion protection of steel. *Progress in Organic Coatings*. 2020. 147. 105803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.105803>
5. Chen C., He Y., Xiao G., Zhong F., Li H., Wu Y. Self-healing coatings with microcapsules for corrosion protection of mild steel: Effects of microcapsule content and pH of the healing agent. *Corrosion Science*. 2021. 184. 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.109357>
6. Dhoke S. K., Khanna A. S., Sinha T. J. M. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2020. 140. 105502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.105502>
7. Guo L., Zhang G., Wang D., Qiao Y., Wang J. Polydopamine-based superhydrophobic surfaces for corrosion protection of carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. 76. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.018>
8. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. 21(1). 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. 2(7). 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7))
10. Jia Z., Kou K., Qin M., Wu H., Pich A. Advanced polyurethane coatings for enhanced corrosion protection of rail infrastructure. *Chemical Engineering Journal*. 2022. 428. 131156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131156>
11. Li W., Li D., Fu Q., Pan C. Graphene oxide/waterborne polyurethane composites for corrosion protection of mild steel. *Journal of Materials Science*. 2020. 55(24). 10538–10553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04750-z>
12. Palanivel V., Zhu D., van Ooij W. J. Corrosion protection properties of organofunctional silanes for aluminum alloys. *Progress in Organic Coatings*. 2021. 153. 106157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106157>
13. 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. 5(1). 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
14. 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). 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ramezanzadeh B., Karimi B., Ramezanzadeh M. Epoxy nanocomposite coatings reinforced with functionalized graphene oxide for long-term corrosion protection of steel. *Composites Part B: Engineering*. 2020. 183. 107686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107686>
16. Sathiyarayanan S., Azim S. S., Venkatachari G. Corrosion protection of steel by polyaniline-TiO<sub>2</sub> composite coatings. *Electrochimica Acta*. 2020. 338. 135803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135803>
17. Zhang F., Ju P., Pan M., Zhang D., Huang Y., Li G. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*. 2021. 144. 74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005>

### **O. V. Fomin**

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominaleksejvictorovic@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

### **O. S. Kozynka**

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

### **A. O. Klymash**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

St. Ioanna Pavla II, 17, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (050) 999-32-60 E-mail: klimash@snu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

### **V. V. Obukhovsky**

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (067) 356-48-25, E-mail: obukhovskyyv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-3021-4714>

### **O. A. Lutsenko**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

St. Ioanna Pavla II, 17, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (050) 590-65-85 E-mail: lutsenko @snu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1070-8887>

## CLASSIFICATION OF POLYMER COATINGS FOR LOAD-BEARING COMPONENTS OF FREIGHT CARS

*This article presents a classification of polymer coatings used to protect the load-bearing components of freight railway cars. The coatings are categorized by chemical composition, functional purpose, and operating conditions. Special attention is given to modern hybrid coatings that combine high corrosion resistance, mechanical strength, and weather durability. The article analyzes the physical, mechanical, and operational properties of polymer materials of various classes in order to assess their suitability for use in freight rail transport. It also examines polymers that have the potential to be used for protecting structural elements and car bodies of freight wagons. Key selection criteria for polymers are identified, and recommendations are provided for the optimal use of materials depending on operating conditions. The article formulates guidelines for selecting optimal coatings and application technologies. The material is intended for railway industry specialists and developers of protective systems.*

**Key words:** transportation, mechanics, railway transport, transport technologies, freight cars, industry, maintenance, operation, reliability, protective coatings.

## REFERENCES

1. Fischer, H., & Wagner, D. (2020). Accelerated aging tests for polymer coatings in railway environments. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109275>
2. Li, X., Wang, Y., & Zhang, G. (2021). Superhydrophobic polymer coatings for marine and transport applications. *Advanced Materials Interfaces*, 8(4), 2001498. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202001498>
3. Wang, H., Liu, J., & Yang, M. (2020). Hybrid silane-polyurethane coatings for heavy equipment: Corrosion and abrasion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 404, 126484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126484>
4. Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulara, S., & Aslam, J. (2020). Performance of epoxy-polyamide coatings reinforced with nano-TiO<sub>2</sub> for corrosion protection of steel. *Progress in Organic Coatings*, 147, 105803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105803>
5. Chen, C., He, Y., Xiao, G., Zhong, F., Li, H., & Wu, Y. (2021). Self-healing coatings with microcapsules for corrosion protection of mild steel: Effects of microcapsule content and pH of the healing agent. *Corrosion Science*, 184, 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109357>
6. Dhoke, S. K., Khanna, A. S., & Sinha, T. J. M. (2020). Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings. *Progress in Organic Coatings*, 140, 105502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105502>
7. Guo, L., Zhang, G., Wang, D., Qiao, Y., & Wang, J. (2021). Polydopamine-based superhydrophobic surfaces for corrosion protection of carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 76, 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.018>
8. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 21(1), 28–34. DOI: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2(7), 6–12. DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7))
10. Jia, Z., Kou, K., Qin, M., Wu, H., & Pich, A. (2022). Advanced polyurethane coatings for enhanced corrosion protection of rail infrastructure. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131156>
11. Li, W., Li, D., Fu, Q., & Pan, C. (2020). Graphene oxide/waterborne polyurethane composites for corrosion protection of mild steel. *Journal of Materials Science*, 55(24), 10538–10553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04750-z>
12. Palanivel, V., Zhu, D., & van Ooij, W. J. (2021). Corrosion protection properties of organofunctional silanes for aluminum alloys. *Progress in Organic Coatings*, 153, 106157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106157>
13. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5(1), 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
14. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1)(92), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ramezanzadeh, B., Karimi, B., & Ramezanzadeh, M. (2020). Epoxy nanocomposite coatings reinforced with functionalized graphene oxide for long-term corrosion protection of steel. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107686>
16. Sathiyarayanan, S., Azim, S. S., & Venkatachari, G. (2020). Corrosion protection of steel by polyaniline–TiO<sub>2</sub> composite coatings. *Electrochimica Acta*, 338, 135803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135803>
17. Zhang, F., Ju, P., Pan, M., Zhang, D., Huang, Y., & Li, G. (2021). Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*, 144, 74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005>