

Фомін О. В., Козинка О.С., Лопатюк С.П., Красулін О. С., Харченко Т. В.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТІВ ЯКІ САМОВІДНОВЛЮЮТЬСЯ В НЕСІВНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У роботі розглядаються сучасні тенденції та перспективи впровадження самовідновлюваних покриттів у несівні конструкції транспортних засобів. Особливу увагу приділено інноваційним матеріалам на основі полімерів з вмонтованими мікрокапсулами, термо- та світлочутливим компонентам, здатним до автономного усунення мікропошкоджень. Аналізуються механізми самовідновлення, зокрема хімічна регенерація, фізико-механічне "затягування" тріщин, а також потенціал використання наноматеріалів. Застосування таких покриттів у несівних елементах (панелі кузова, підрамники, допоміжні каркаси) дозволяє значно знизити темпи деградації матеріалу, продовжити ресурс конструкції та зменшити витрати на технічне обслуговування. Обговорено виклики щодо довготривалої стабільності таких покриттів у складних умовах експлуатації та шляхи їх вирішення. Визначено, що розвиток самовідновлюваних технологій відкриває нові горизонти для підвищення надійності, безпеки та екологічності транспортних засобів. У статті розглядаються сучасні самовідновлювані матеріали та технології, що знаходять застосування в галузі машинобудування. Особливу увагу приділено полімерним композитам із мікрокапсульованими реагентами, сплавам з пам'яттю форми, а також самовідновлюваним покриттям на основі термо- та світлочутливих полімерів. Описані принципи їх дії, зокрема реакції повторного зшивання, капсульована регенерація та теплове "запам'ятовування" форми. Наведено приклади використання в конструктивних елементах транспортних засобів, вузлах з високим зношуванням, а також у системах захисного покриття. Зазначено основні переваги впровадження таких матеріалів: зменшення експлуатаційних витрат, підвищення довговічності вузлів, зниження потреби в обслуговуванні та підвищення безпеки. Перспективи розвитку включають інтеграцію біоінженерних технологій та "розумних" матеріалів із функцією активного моніторингу та саморемонту. У даній роботі розглянуто основні вимоги до самовідновлювальних захисних покриттів, призначених для несівних конструкцій вантажних вагонів. З урахуванням специфіки експлуатації рухомого складу залізничного транспорту сформульовано комплекс функціональних, механічних, кліматичних та технологічних критеріїв, яким повинні відповідати інноваційні покриття з властивістю самовідновлення. Основна увага приділена використанню полімерних композицій. Наведено обґрунтування ключових параметрів, таких як адгезія, антикорозійна стійкість, зносостійкість, термостійкість, гідрофобність, а також їх вплив на експлуатаційну надійність вантажного вагона. Запропоновані вимоги можуть бути використані при розробці нових матеріалів, технічних регламентів та стандартів для залізничного транспорту. Самовідновлювані матеріали розглядаються як ключовий елемент стратегії сталого машинобудування майбутнього.

Ключові слова: транспорт, механіка, вагони, транспортні технології, комп'ютерне моделювання, інженерна графіка, покриття захисні які самовідновлюються.

Актуальність дослідження.

Сучасний транспортний сектор стикається з постійними викликами, пов'язаними з довговічністю, безпекою та економічною ефективністю експлуатації техніки. Однією з перспективних інновацій у цій галузі є розробка та впровадження покриттів, які здатні самовідновлюватися після механічних пошкоджень. Такі матеріали можуть значно продовжити ресурс несівних конструкцій, які піддаються високим навантаженням під час роботи. Мікротріщини, корозія та інші дефекти, що виникають у процесі експлуатації, часто призводять до дорогого ремонту або навіть виведення техніки з ладу. Самовідновлювальні покриття здатні автономно усувати ці пошкодження, запобігаючи їхньому прогресуванню та зберігаючи структурну цілісність матеріалів.

Актуальність науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у цьому напрямку обумовлена потребою у зниженні витрат на технічне обслуговування та ремонт транспортних засобів. Використання таких технологій особливо важливе для авіації, автомобілебудування та суднобудування, де надійність конструкцій безпосередньо впливає на безпеку людей. Крім того, самовідновлювальні матеріали можуть зменшити вплив транспортної галузі на навколишнє середовище за рахунок збільшення строку служби деталей та зниження кількості відходів.

Дослідження в цій сфері включають вивчення різних механізмів самовідновлення, таких як капсульовані полімери, мікрокапсули з відновлювальними агентами або матеріали з пам'яттю форми. Важливим етапом є тестування таких покриттів у реальних умовах експлуатації, зокрема при різних температурах, вологості та механічних навантаженнях. Розробка ефективних технологій потребує міждисциплінарного підходу, залучення фахівців з хімії, матеріалознавства та машинобудування.

Впровадження самовідновлювальних покриттів у транспортній галузі відкриває нові можливості для створення більш довговічних, екологічних та економічно вигідних конструкцій. Це дозволить не лише підвищити конкурентоздатність вітчизняного транспорту, але й забезпечити його безпеку та надійність у довгостроковій перспективі. Тому подальші наукові дослідження та практичні розробки в цьому напрямку є надзвичайно актуальними та перспективними.

Постановка проблеми

Самовідновлювані покриття для несівних конструкцій транспортних засобів є перспективним напрямком, але їхнє практичне застосування потребує подальшого дослідження. Головною проблемою є відсутність стандартизованих методів оцінки довговічності та ефективності самовідновлення таких покриттів у реальних умовах експлуатації. Недостатньо вивчені механізми самовідновлення при різних типах механічних пошкоджень, таких як подряпини, тріщини або корозійні впливи. Важливо визначити оптимальні умови, за яких покриття здатні відновлювати свою структуру без втрати міцнісних характеристик. Не вирішено питання стійкості самовідновлюваних покриттів до дії агресивних середовищ, таких як розчини солей, палива та мастила. Варто дослідити вплив циклічних навантажень на тривалість та ефективність самовідновлення матеріалів. Недостатньо розроблені методи нанесення таких покриттів на великогабаритні несівні конструкції з урахуванням технологічних обмежень. Важливою проблемою є відсутність економічно обґрунтованих рішень для масового виробництва самовідновлюваних покриттів. Необхідно вивчити взаємодію таких покриттів із традиційними захисними шарами, що використовуються у транспортному машинобудуванні. Актуальним залишається питання про довгострокову стабільність самовідновлювальних властивостей під час експлуатації. Недостатньо досліджено вплив температури на швидкість та якість відновлення покриттів у різних кліматичних умовах. Відкритим залишається питання про оптимальну товщину покриття, яка забезпечує баланс між захисними властивостями та вагою конструкції. Необхідно розробити методики неруйнівного контролю стану самовідновлюваних покриттів під час експлуатації. Важливою проблемою є обмежена кількість матеріалів, здатних до ефективного самовідновлення при збереженні необхідних механічних характеристик. Необхідно дослідити можливість комбінування самовідновлюваних покриттів із функціями антикорозійного захисту. Варто вивчити вплив тривалої вібрації на ефективність самовідновлення покриттів у несівних вузлах транспортних засобів. Не вирішено питання про оптимальні способи ремонту та обслуговування конструкцій із самовідновлюваними покриттями. Важливо розробити методи прогнозування ресурсу таких покриттів з урахуванням реальних умов експлуатації. Необхідно дослідити вплив ультрафіолетового випромінювання на довговічність самовідновлюваних покриттів. Актуальним є питання про екологічну безпеку матеріалів, що використовуються для створення самовідновлюваних покриттів. Відсутність нормативної бази для сертифікації таких покриттів у транспортному машинобудуванні ускладнює їхнє впровадження. Необхідно розробити стандартизовані методики випробувань самовідновлюваних покриттів для несівних конструкцій. Важливою проблемою є висока вартість багатьох самовідновлюваних матеріалів, що обмежує їхнє комерційне застосування. Необхідно дослідити можливість створення гібридних покриттів, які поєднують самовідновлення з іншими корисними властивостями. Варто вивчити вплив технології нанесення покриттів на їхню здатність до самовідновлення. Остаточо не визначено критерії оцінки ефективності самовідновлюваних покриттів для несівних конструкцій транспортних засобів.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики.

Стаття [1] присвячена самовідновлюваним покриттям, які реагують на корозію. Автори досліджують розробку матеріалів, здатних автоматично відновлювати пошкодження, спричинені корозійними процесами. У роботі, ймовірно, представлені різні механізми самовідновлення, що активуються корозійними агентами. Отримані результати можуть бути корисними для створення довговічних захисних покриттів для металевих конструкцій. Дослідження сприяє розвитку матеріалів з підвищеною стійкістю до корозії та здатністю до самовідновлення.

Публікація [2] представляє інноваційні поліакрилатні покриття з функцією самовідновлення, що активується ультрафіолетовим випромінюванням, для підвищення довговічності в різних застосуваннях. Автори досліджують механізм відновлення пошкоджень у цих полімерних матеріалах під впливом УФ-світла. У роботі, ймовірно, описано синтез покриттів, їхні властивості та ефективність самовідновлення. Розробка таких покриттів може значно подовжити термін служби виробів, що піддаються впливу УФ-випромінювання та механічних пошкоджень. Дослідження є важливим для створення довговічних функціональних матеріалів.

У науковій роботі [3] присвячена дослідженням у галузі хімії. Для більш конкретного аналізу потрібна назва самої статті. Робота представляє наукові результати, отримані авторами у цій галузі. Дослідження може стосуватися органічної, неорганічної, фізичної або матеріальної хімії.

Наукове дослідження [4] представляє розробку антикорозійних покриттів з ефективними властивостями самовідновлення на основі нановолокон типу "ядро-оболонка", отриманих методом мікрофлюїдного електроформування. Автори описують створення спеціальної архітектури нановолокон, яка забезпечує як захист від корозії, так і здатність до автоматичного відновлення пошкоджень. У роботі, ймовірно, представлені методи отримання нановолокон, їхні характеристики та результати випробувань антикорозійних та самовідновлювальних властивостей. Цей підхід є перспективним для створення високопродуктивних захисних покриттів. Дослідження демонструє потенціал мікрофлюїдних технологій у створенні функціональних матеріалів.

У статті [5] розглядаються питання забезпечення екологічної безпеки бурових суден під час їхньої експлуатації в особливих екологічних регіонах Північної Європи. Автори аналізують потенційні екологічні ризики, пов'язані з діяльністю бурових суден, та пропонують шляхи їхнього зменшення. У роботі, ймовірно, досліджуються технології запобігання забрудненню, методи моніторингу екологічного стану та регуляторні аспекти. Стаття підкреслює важливість сталого розвитку та охорони навколишнього середовища при здійсненні

промислової діяльності у вразливих екосистемах. Дослідження сприяє розробці екологічно відповідальних технологій для морської промисловості.

Книга [6] присвячена самовідновлюваним покриттям. Автор розглядає різні аспекти цієї галузі, включаючи типи самовідновлювальних механізмів, застосовувані матеріали та методи їхнього створення. У книзі, ймовірно, представлено огляд сучасних досягнень, проблем та перспектив розвитку самовідновлюваних покриттів для різних галузей промисловості. Це видання є цінним ресурсом для дослідників та інженерів, зацікавлених у розробці та застосуванні довговічних захисних покриттів. Книга сприяє поглибленому розумінню принципів та технологій самовідновлення в покриттях.

Науково-прикладна робота [7] є оглядом дефектів, що виникають у сталевих морських спорудах, та розроблених методів їхнього підсилення. Автори, ймовірно, систематизують інформацію про типові пошкодження, спричинені морським середовищем та експлуатаційними навантаженнями. В огляді також мають бути представлені існуючі та новітні технології відновлення та зміцнення таких конструкцій. Ця праця є цінним ресурсом для інженерів, які займаються проектуванням, будівництвом та обслуговуванням морських споруд. Огляд сприяє кращому розумінню проблем довговічності морських металевих конструкцій.

У статті [8] розглянуто вплив мікроструктури на морську корозію зварних з'єднань низьковуглецевої сталі, що використовуються в прибережних та морських спорудах, з урахуванням навантажень від хвиль та вітру. Автори, ймовірно, досліджували взаємозв'язок між мікроструктурними особливостями зварних швів та їхньою корозійною стійкістю в агресивному морському середовищі. Робота може містити результати експериментальних досліджень або аналіз існуючих даних. Отримані висновки є важливими для вибору оптимальних матеріалів та технологій зварювання для забезпечення довговічності морських конструкцій. Дослідження сприяє підвищенню надійності зварних елементів у морських умовах.

Автори публікації [9] розглядають питання розробки структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивів та оцінку якості її функціонування. Автори пропонують концепцію системи, яка може допомагати машиністам приймати обґрунтовані рішення в різних експлуатаційних ситуаціях. У роботі, ймовірно, описано основні компоненти системи та алгоритми її роботи. Результати оцінки якості функціонування можуть свідчити про потенційні переваги впровадження таких систем для підвищення ефективності та безпеки залізничних перевезень. Дослідження є внеском у розвиток інтелектуальних транспортних систем.

В статті [10] автори досліджують теоретичне та практичне визначення параметрів бортових емнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори досліджують можливість використання конденсаторів для рекуперації енергії гальмування та її подальшого використання. У роботі, ймовірно, представлені математичні моделі, експериментальні дослідження або їх комбінація для визначення оптимальних параметрів накопичувачів. Отримані результати можуть бути використані для проектування енергоефективних систем живлення для метрополітену. Дослідження сприяє розробці екологічно чистих та енергозберігаючих технологій у міському транспорті.

У роботі [11] представлено визначення раціональних параметрів системи емнісного накопичення енергії для підземного залізничного рухомого складу. Автори досліджують оптимальні характеристики накопичувачів для ефективного використання рекуперованої енергії. У роботі, ймовірно, представлені результати моделювання або аналізу експлуатаційних даних для визначення ключових параметрів системи. Отримані висновки можуть бути використані для проектування енергоефективних систем живлення для метрополітену, що дозволить знизити енергоспоживання та експлуатаційні витрати. Дослідження є важливим для розвитку енергозберігаючих технологій у міському електротранспорті.

Стаття [12] досліджує передові мікро- та нанокapsули для самовідновлюваних покриттів. Автори аналізують різні типи капсул, що містять відновлювальні агенти, та методи їхнього впровадження в покриття для забезпечення здатності до самозаліковування пошкоджень. У роботі, ймовірно, представлено огляд останніх досягнень у цій галузі, включаючи матеріали капсул, механізми вивільнення відновлювальних агентів та ефективність самовідновлення. Дослідження є важливим для розробки довговічних та стійких до пошкоджень захисних покриттів для різноманітних застосувань. Стаття сприяє розумінню потенціалу мікро- та нанокapsульних технологій у створенні самовідновлюваних матеріалів.

Наукове дослідження [13] вивчає використання біопалива в морських дизельних двигунах для забезпечення сталого та безпечного морського транспорту. Автори аналізують потенціал різних видів біопалива як альтернативи традиційному судовому паливу. У роботі, ймовірно, оцінюються екологічні, економічні та технічні аспекти використання біопалива в морських суднах. Результати дослідження можуть сприяти переходу до більш екологічно чистого морського транспорту. Стаття є важливим внеском у пошук стабільних енергетичних рішень для морської галузі.

В роботі [14] класифіковано самовідновлювані композитні покриття з захисним та антикорозійним потенціалом за механізмом їхнього відновлення. Автори систематизують різні підходи до створення самовідновлюваних матеріалів, що використовуються для захисту від корозії. У роботі розглядаються хімічні та фізичні механізми самовідновлення, а також їхнє застосування в композитних покриттях. Цей огляд є цінним для розуміння принципів роботи та класифікації самовідновлюваних захисних покриттів. Дослідження сприяє розробці нових ефективних антикорозійних матеріалів.

Публікація [15] представляє дослідження ефективності самовідновлення багатофункціональних полімерних розумних покриттів. Автори вивчають здатність полімерних матеріалів автоматично відновлювати пошкодження, а також їхні додаткові функціональні властивості. У роботі, ймовірно, представлені різні типи

полімерних покриттів та оцінка їхньої ефективності самовідновлення в залежності від умов експлуатації. Дослідження є важливим для розробки довговічних та стійких до пошкоджень розумних матеріалів. Стаття демонструє потенціал полімерних покриттів у створенні самовідновлюваних систем.

В статті [16] описується процес отримання та характеристика нанокапсул, що містять алкідну смолу на основі кокосової олії, для використання у самовідновлюваних епоксидних покриттях. Автори застосували метод електророзпилення для створення нанокапсул та дослідили їхні властивості. У роботі також представлено процес інтеграції цих нанокапсул в епоксидні покриття та оцінка їхньої здатності до самовідновлення. Дослідження є внеском у розробку екологічно чистих самовідновлюваних покриттів на основі природних матеріалів. Стаття демонструє можливість використання нанокапсулювання для створення функціональних покриттів.

У статті [17] досліджуються механізми самовідновлення антикорозійних покриттів з використанням методів комп'ютерного матеріалознавства. Автори застосували обчислювальні підходи для моделювання та аналізу процесів, що відбуваються під час самовідновлення пошкоджень у захисних покриттях. У роботі, ймовірно, представлені результати симуляцій, які дозволяють краще зрозуміти молекулярні та атомні механізми відновлення. Це дослідження сприяє розробці більш ефективних самовідновлюваних антикорозійних матеріалів на основі фундаментального розуміння процесів. Застосування комп'ютерного моделювання є важливим інструментом для оптимізації властивостей таких покриттів.

Методи дослідження. Самовідновлювальні покриття для несівних конструкцій транспортних засобів досліджуються через експериментальні тести, які оцінюють їхню здатність загоювати тріщини під навантаженням. Комп'ютерне моделювання, зокрема метод скінченних елементів, допомагає прогнозувати довговічність таких покриттів у реальних умовах експлуатації. Аналіз механічних властивостей включає випробування на міцність, стійкість до корозії та циклічних навантажень. Дослідження економічної доцільності показують, чи є виробництво таких матеріалів вигідним у порівнянні з традиційними аналогами. Перспективи застосування залежать від поєднання цих факторів, включаючи технологічну доступність та екологічну безпеку матеріалів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження – несівні конструкції транспортних засобів, які піддаються механічним і корозійним пошкодженням. Предмет дослідження – самовідновлювані покриття, здатні автономно або за зовнішнього впливу усувати дефекти, зберігаючи цілісність конструкції. Вивчення таких матеріалів дозволить оцінити їхній потенціал для підвищення довговічності та безпеки транспорту. Перспективи застосування включають зниження витрат на ремонт, збільшення ресурсу експлуатації та розвиток "розумних" матеріалів для майбутніх транспортних систем

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є аналіз потенціалу самовідновлювальних покриттів для підвищення довговічності та експлуатаційної надійності несівних конструкцій транспортних засобів: Першою задачею є вивчення існуючих матеріалів і технологій самовідновлення, що застосовуються в інших галузях промисловості. Другою задачею є формулювання основних вимог до самовідновлювальних покриттів з урахуванням навантажень і умов експлуатації несівних конструкцій. Третя задача полягає у дослідженні хімічних, фізичних та біологічних механізмів, що забезпечують автономне відновлення покриттів. Четвертою задачею є експериментальна перевірка ефективності різних типів самовідновлювальних покриттів у лабораторних та натурних умовах. П'ята задача передбачає аналіз вартості виробництва та експлуатації таких покриттів порівняно з традиційними методами захисту.

Виклад основного матеріалу.

1) Існуючі матеріали і технології самовідновлення, що застосовуються в різних галузях промисловості.

Самовідновлювальні матеріали – це інноваційні матеріали, які здатні автономно або під впливом зовнішніх чинників відновлювати свої властивості після пошкоджень (наприклад, тріщин, подряпин або деформацій), без або з мінімальним втручанням людини.

1. Самовідновлювані полімери. Матеріали, які можуть "залатати" мікротріщини або пошкодження без втручання людини. Розглянемо існуючі матеріали і технології самовідновлення, які активно застосовуються в промисловості. Технології: 1) Мікрокапсули: усередині матеріалу вмонтовані капсули з реактивами, які вивільняються при розриві. 2) Полімери з Diels–Alder реакцією: з'єднання можуть знову зшиватися при нагріванні. Застосування в авіа- та автопромисловості (фарби, кузовні елементи), електроніка (захисні оболонки, ізоляція).

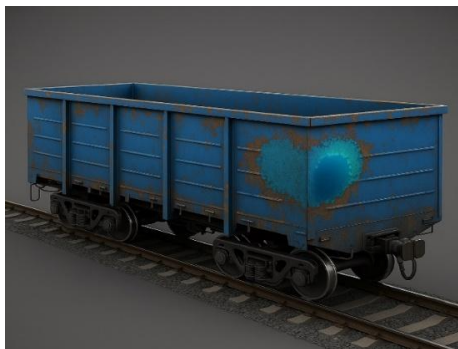


Рисунок 1 – Вантажний напіввагон з самовідновлювальним покриттям

Самовідновлювальні покриття – це спеціальні захисні шари, які мають здатність автоматично відновлювати свої властивості після механічного, хімічного або фізичного пошкодження, без або з мінімальним втручанням людини. На (рис.1) зображено вантажний напіввагон з самовідновлюваним покриттям.

2. Самовідновлюваний бетон. Бетон, що самостійно "затягує" тріщини. Технології: 1) Бактерії (*Bacillus sphaericus*): продукують вапно у вологому середовищі, що закупорює тріщини. 2) Капсульовані реагенти (наприклад, силікати) в тілі бетону. Застосування: мости, тунелі, дамби, високоавантажені конструкції.

3. Самовідновлювані метали та сплави. Матеріали, які можуть повертати свої властивості після деформації. Технології: 1) Пам'ять форми (Nitinol, сплави на основі титану): повернення до початкової форми при нагріванні. 2) Градієнтні структури та наночастинки: в лабораторних розробках. Застосування: медицина (стенти, імпланти), авіація, робототехніка

4. Самовідновлювані покриття. Поверхні, що можуть самі відновлювати дрібні подряпини або пошкодження. Технології: 1) Термоактивні полімери: активуються теплом. 2) УФ-активні покриття: відновлюються під дією світла. Застосування: побутова електроніка, автомобільні покриття, антикорозійні системи.

5. Біологічні та біогібридні матеріали. Матеріали, що черпають натхнення з біологічних процесів (наприклад, шкіра, кістка). Технології: 1) Гідрогелі з клітинами. 2) Матеріали з природних білків (шелак, колаген). Застосування: тканинна інженерія, біоелектроніка, біомедичні імпланти.

Принципи роботи самовідновлення

Тип покриття	Механізм відновлення
Покриття з мікрокапсулами	У тріщину потрапляє капсула з полімером → витікає і твердне, "латаючи" пошкодження
Полімери з динамічними зв'язками	При нагріванні зв'язки між молекулами поновлюються → структура «затягується»
Термо-/УФ-активовані покриття	Вплив температури чи світла активує процес самовідновлення
Нанопокриття на основі графену, силікатів	Високі адгезійні властивості дозволяють "склеювати" тріщини

Переваги самовідновлюваних матеріалів у машинобудуванні: зниження експлуатаційних витрат; підвищення надійності та ресурсу деталей; зменшення потреби в обслуговуванні та ремонті; підвищення безпеки (особливо в критичних вузлах).

Розглянемо таблицю самовідновлюваних матеріалів і технологій, які застосовуються в машинобудуванні:

Самовідновлювані матеріали в машинобудуванні

Тип матеріалу / технології	Принцип дії	Застосування в машинобудуванні	Переваги
Полімери з мікрокапсулами	Мікрокапсули з реагентами руйнуються при тріщинах → заповнення дефекту	Фарбування кузовів, деталі панелей	Зниження витрат на обслуговування
Полімери з динамічними зв'язками (Diels–Alder)	Відновлення структури при нагріванні (реакція зворотного зшивання)	Втулки, амортизуючі елементи, прокладки	Повторне використання, ремонт без демонтажу
Самовідновлювані фарби/лаки	Реагують на тепло або світло, "затягують" подряпини	Захисне покриття кузовів, інтер'єру автомобілів	Покращення естетики, продовження ресурсу
Сплави з пам'яттю форми (SMA)	Відновлюють початкову форму після деформації при нагріванні	Актори, з'єднання, кріплення, демпфери	Мала вага, самоналаштування
Самовідновлювані композити	Вмонтовані волокна або капсули, які з'єднують волокна при розриві	Лопасті турбін, несучі елементи, корпуси електродвигунів	Легка вага + висока міцність
Бактеріальні технології (експериментальні)	Біоматеріали "зарощують" тріщини у матеріалах	Поки в дослідній фазі – можливо в двигунах або корпусах	Саморегенерація в агресивному середовищі

2) Формулювання основних вимог до самовідновлювальних покриттів з урахуванням навантажень і умов експлуатації несівних конструкцій.

Ефективність експлуатації вантажних вагонів значною мірою залежить від стану зовнішніх і внутрішніх поверхонь несівних конструкцій, які піддаються дії агресивних середовищ, механічних навантажень, кліматичних чинників та корозії. З метою підвищення довговічності та зниження витрат на ремонт і обслуговування конструкцій, перспективним є використання самовідновлювальних захисних покриттів, що забезпечують автоматичне усунення локальних пошкоджень без зовнішнього втручання.

До таких покриттів висувається комплекс вимог, які враховують як особливості умов експлуатації вантажного вагона, так і властивості сучасних полімерних матеріалів, збагачених мікрокапсулами або наночастинками.

1) Функціональні вимоги

Механічна стійкість. Покриття повинно витримувати динамічні та ударні навантаження, які виникають під час руху вагона, а також забезпечувати високу зносостійкість при контакті з абразивними частинками та сипучими вантажами.

Самовідновлюваність. Покриття має містити інкапсульовані реагенти або функціональні наночастинки, здатні ініціювати відновлення структури при локальному пошкодженні. Ефективність відновлення повинна становити не менше 80 % від початкових захисних властивостей.

Антикорозійна здатність. Матеріал повинен забезпечувати довготривалий захист металевій основі від корозії у складних атмосферних умовах (волога, сіль, промислові гази). Тривалість захисту в умовах соляного туману має становити не менше 500 годин згідно з ISO 9227.

Термостійкість та стабільність. Покриття повинно зберігати цілісність та захисні властивості при експлуатації в температурному діапазоні від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, без утворення тріщин, відшарувань або зміни структури.

Стійкість до ультрафіолетового випромінювання. При тривалому впливі сонячного світла покриття має не втрачати механічної міцності, кольору та адгезії. Стійкість до УФ-випромінювання повинна становити не менше 1000 годин у відповідності до стандартів штучного старіння (ASTM G154).

Гідрофобність і самоочищення. Наявність self-cleaning ефекту, що досягається шляхом створення наноструктурованої поверхні, є бажаною для зменшення забруднення покриття. Кут змочування водою має перевищувати 100° , що свідчить про наявність гідрофобного ефекту.

2) Технологічні та експлуатаційні вимоги

Адгезія до металу. Покриття повинно демонструвати високу адгезію до сталевій поверхні конструкцій вантажного вагона. Значення адгезії має перевищувати 6 МПа (за ISO 4624).

Технологічність нанесення. Матеріал повинен бути придатний до нанесення за допомогою стандартних методів (кисть, валик, безповітряне розпилення) в умовах виробничого циклу або під час технічного обслуговування на ремонтних базах.

Багаторазова здатність до самовідновлення. Для досягнення високого ресурсу покриття, його структура має забезпечувати можливість багаторазового відновлення у місцях пошкодження завдяки поступовому вивільненню інкапсульованого реагенту або повторній активації функціональних компонентів.

Екологічність і безпека. Компоненти покриття повинні бути безпечними для навколишнього середовища, не виділяти шкідливих речовин під час експлуатації та відповідати вимогам пожежної безпеки (негорючість або важковогненність).

Якщо ми говоримо про вантажні вагони, то мова йде про великі несівні конструкції, які працюють у важких умовах (механічні навантаження, перепади температур, волога, агресивне середовище). Якщо ж покриття виконані на основі полімерів з капсулами або наночастинок, то до них варто додати конкретні вимоги, пов'язані з особливостями цих матеріалів.

Основні вимоги до самовідновлювальних полімерних покриттів з капсулами та наночастинками для несівних елементів вантажного вагона:

1. Висока зносостійкість і механічна міцність. Покриття повинно витримувати ударні, вібраційні та циклічні навантаження під час руху поїзда. Здатність протистояти абразивному зношуванню при контакті з сипучими вантажами, камінням, пилом тощо.

2. Ефективна самовідновлювальна здатність. Включення мікрокапсул, які при пошкодженні вивільняють відновлювальний агент (наприклад, полімеризуючу смолу). Відновлення мікропошкоджень і тріщин без втручання людини. У разі нанопокриття – використання наночастинок (наприклад, діоксиду титану, графену, нанокремнезему), які забезпечують структурну цілісність або каталітичне самозцілення.

3. Атмосферостійкість і хімічна стійкість. Стійкість до корозії, УФ-випромінювання, кислотних дощів, снігу, дорожніх реагентів. Витримка довготривалого впливу вологи, перепадів температур (-40 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і більше).

4. Низька адгезія до бруду (self-cleaning ефект). За рахунок наноструктур можлива реалізація ефекту лотоса – покриття не затримує бруд, воду, мастила.

5. Надійна адгезія до металевих поверхонь. Покриття має добре зчіплюватися з вуглецевою сталлю чи іншими матеріалами кузова вагона навіть при вібраціях, температурних розширеннях та стисненнях.

6. Технологічність у нанесенні. Застосування промислових методів нанесення — фарбування, розпилення, напилення або двокомпонентні системи з активацією капсул. Можливість нанесення у польових умовах або на заводах чи депо.

7. Експлуатаційна довговічність. Покриття повинне зберігати захисні властивості не менше 6–10 років без капітального ремонту. Багаторазова самовідновлюваність – покриття має відновлюватися після кількох пошкоджень у одному й тому ж місці.

8. Екологічність і безпечність. Використання негорючих або важковогненних полімерів. Відсутність токсичних викидів при руйнуванні покриття або при його нанесенні.

Приведемо приклад самовідновлювальних матеріалів, які можна використати на підприємствах Укрзалізниці для продовження довговічності насінних конструкцій рухомого складу:

Полімерні матриці з капсулами DCPD (дихлопентадієну) з каталізаторами для самополімеризації. Одним з найефективніших підходів до реалізації хімічного механізму самовідновлення в полімерних покриттях є використання інкапсульованого дихлопентадієну (DCPD). Цей мономер, розміщений у мікрокапсулах, виконує функцію "реагенту-відновлювача", що активується лише у разі механічного пошкодження покриття.

Капсули з DCPD зазвичай виготовляють з меламін-формальдегідної оболонки, діаметром від 10 до 200 мкм. Вони рівномірно розподіляються у полімерній матриці (наприклад, епоксидній або поліуретановій). При виникненні тріщини або подряпини, мікрокапсули в зоні пошкодження руйнуються, вивільняючи DCPD у тріщину.

Одночасно в матриці присутній каталізатор рутенію (каталізатор Граббса), який ініціює ріметатезну полімеризацію DCPD за механізмом "ring-opening metathesis polymerization" (ROMP). Внаслідок цього відбувається формування нової полімерної фази в тріщині, яка з'єднує краї пошкодження та відновлює захисну функцію покриття.

Епоксидні або поліуретанові покриття з наночастинками ZnO, TiO₂, Al₂O₃ для підвищення твердості, УФ-захисту та антибактеріального ефекту. До підвищення довговічності та функціональності захисних покриттів для транспортних конструкцій, зокрема вантажних вагонів, особливу увагу привертають епоксидні та поліуретанові матриці, модифіковані неорганічними наночастинками, такими як оксид цинку (ZnO), діоксид титану (TiO₂) та оксид алюмінію (Al₂O₃).

Функції наночастинок у самовідновлювальних покриттях: Антикорозійний ефект. Наночастинки ZnO та TiO₂ мають фотоактивні властивості – під дією ультрафіолету вони можуть каталізувати розклад органічних забруднень або сприяти пасивації поверхні металу, тим самим знижуючи ризик корозії.

Укріплення структури покриття. Включення Al₂O₃ або ZnO у полімерну матрицю зменшує пористість і покращує бар'єрні властивості, перешкоджаючи проникненню вологи та іонів у підкладку.

Підвищення адгезії. Модифіковані наночастинки покращують зв'язок між покриттям і металевою поверхнею, що особливо важливо в умовах вібрацій та механічних навантажень у залізничному транспорті.

3) Дослідження хімічних, фізичних та біологічних механізмів, що забезпечують автономне відновлення самовідновлювальних покриттів.

Розробка ефективних самовідновлювальних покриттів передбачає глибоке розуміння механізмів, які забезпечують відновлення їх функціональності після пошкодження. Відомі три основні типи механізмів самовідновлення: хімічні, фізичні та біологічні. Кожен з них базується на різних принципах, але має спільну мету – забезпечити автономне усунення мікропошкоджень у покриттях без зовнішнього втручання.

Хімічні механізми самовідновлення

Хімічний підхід є найпоширенішим у сфері полімерних захисних покриттів. Основу цього механізму складає капсуляція реагентів, які вивільняються у зоні пошкодження. Найбільш дослідженими системами є: Мікрокапсули з DCPD (дихлопентадієном), які полімеризуються під дією каталізатора (наприклад, каталізатора Граббса), що міститься в матриці. При розриві капсули відбувається інгібована полімеризація з утворенням нової полімерної фази, яка заповнює тріщину. Двокомпонентні системи, де два реагенти, розділені в мікрокапсулах або волокнах, змішуються при руйнуванні покриття та ініціюють полімеризацію (наприклад, поліуретанова або епоксидна система).

Порівняльний аналіз механізмів

Механізм	Швидкість реакції	Багаторазовість	Температурна залежність	Складність реалізації	Приклад системи
Хімічний	Висока	Переважно разова	Помірна	Середня	DCPD + каталізатор
Фізичний	Середня	Багаторазова	Висока	Низька	Термопластичний полімер
Біологічний	Повільна	Теоретично багаторазова	Низька	Висока	Мікрокапсули з бактеріями

Фізичні механізми самовідновлення. Фізичне самовідновлення базується на реологічних властивостях полімерів, здатних до реорганізації та перетікання при нагріванні або під дією вологи. До таких механізмів належать: Використання термопластичних полімерів з ефектом "shape memory", які відновлюють первинну форму при певній температурі. Самозцілювальні еластомери, у яких міжмолекулярні сили дозволяють матеріалу знову з'єднатися після розриву. Такі фізичні процеси зазвичай багаторазові, на відміну від одноразових хімічних реакцій.

Біологічні механізми самовідновлення. Найновішим і біоінспірованим підходом є використання живих або біоактивних систем: Інкапсуляція бактерій (наприклад, *Bacillus subtilis*), які, потрапляючи в тріщини,

активуються вологою або киснем та утворюють мінерали (наприклад, карбонати кальцію), що "герметизують" пошкодження. Ферментативні реакції, де біокатализатори активують полімеризацію або інші процеси самозцілення. Біоміметичні гідрогелі, які можуть регенерувати структуру подібно до клітинної тканини.

Біологічні підходи перспективні для застосування в умовах низьких температур та підвищеної вологості, характерних для залізничного транспорту, проте потребують додаткової стабілізації системи.

4) Експериментальна перевірка ефективності самовідновлювальних покриттів.

Для оцінки реальної ефективності самовідновлювальних покриттів у транспортному машинобудуванні необхідно проводити як лабораторні випробування, так і натурні експерименти в умовах, наближених до експлуатаційних. Це дозволяє вивчити вплив механічних, кліматичних та хімічних чинників на здатність покриттів до автономного відновлення.

У лабораторних умовах основна увага приділяється моделюванню локальних пошкоджень (подряпини, тріщини) та подальшому спостереженню за процесом відновлення. Використовуються такі методи:

- Оптична мікроскопія та SEM-аналіз – для візуального контролю за заповненням тріщини.
- Тест на водопроникність і корозійну стійкість (наприклад, метод сольового туману за ASTM B117).
- Механічні випробування (випробування на вигин, зчеплення, твердість за Шором або Бринеллем) – до та після відновлення.

– Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS) – для оцінки бар'єрних властивостей після пошкодження.

Приклад результату: Покриття на основі епоксидної смоли з 10% мікрокапсул DCPD після навмисного пошкодження відновлювало до 85% міцності на вигин протягом 24 годин при 25 °С.

Натурні дослідження проводяться на реальних зразках або компонентах (наприклад, елементах кузова вантажного вагона) в умовах реальної експлуатації. Основні параметри:

- Циклічні механічні навантаження – імітація вібрацій і ударів під час руху поїзда.
- Кліматичні впливи – зміна температури, вологості, УФ-випромінювання, дощ, сніг.
- Хімічна агресія – дія дорожніх солей, мастил, нафтопродуктів.

На (рис.2) напіввагон, покритий поліуретановою фарбою з капсулами DCPD та наночастинками TiO_2 . Через 6 місяців експлуатації на відкритій колії спостерігалось відсутність ознак розповсюдження корозії навколо штучно нанесених подряпин, на відміну від контрольної ділянки з традиційним покриттям.

Отримані експериментальні дані підтверджують високу ефективність самовідновлювальних покриттів, особливо епоксидних і поліуретанових композицій, модифікованих капсульованими реагентами та нанонаповнювачами. Вони забезпечують не лише збереження цілісності покриття після пошкодження, але й суттєво знижують ризик розвитку підпокриттєвої корозії. Результати натурних випробувань свідчать про перспективність впровадження таких технологій у виробництво вантажних вагонів.

Запропоновані самовідновлювальні покриття є перспективними для впровадження у сфері захисту вантажних вагонів та інших металевих конструкцій, що працюють у складних умовах. Вони забезпечують довготривалий захист без необхідності частого обслуговування, що має вагоме економічне значення для залізничної галузі.



Рисунок 2 – Напіввагон, покритий поліуретановою фарбою з капсулами DCPD та наночастинками TiO_2

5) Аналіз вартості виробництва та експлуатації самовідновлювальних покриттів порівняно з традиційними методами захисту.

Традиційні покриття для рухомого складу, зокрема для локомотивів, пасажирських і вантажних вагонів, трамваїв та електропоїздів, виконують важливі функції захисту металевих поверхонь від корозії, зношування, впливу вологи, ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень. Крім захисної ролі, вони також забезпечують естетичний вигляд рухомого складу, що є важливим для іміджу транспортних компаній.

Системи традиційного покриття, як правило, складаються з трьох основних шарів. Першим наноситься антикорозійна ґрунтовка, яка може містити цинкові або фосфатні компоненти. Вона забезпечує початковий хімічний захист поверхні металу. Далі застосовується проміжний шар, часто на основі епоксидних або поліуретанових смол, який створює бар'єр для вологи та агресивних хімічних речовин. Завершальним етапом є

нанесення декоративного фінішного шару – це поліуретанова, акрилова або алкідна фарба, що надає бажаний колір, блиск та стійкість до впливу навколишнього середовища.

Типова система покриття для одного вагона включає нанесення антикорозійної ґрунтовки товщиною близько 50 мікрметрів, проміжного захисного шару товщиною приблизно 80 мікрметрів, а також фінішного декоративного покриття товщиною 40–60 мікрметрів. Такий підхід дозволяє забезпечити загальну довговічність покриття до 5–7 років, після чого необхідне повторне фарбування або локальний ремонт.

Основними перевагами традиційних покриттів є їх доступність, невисока вартість, широке розповсюдження та простота нанесення, а також можливість проведення локального ремонту без демонтажу обладнання. Крім того, на ринку існує велика кількість виробників, таких як AkzoNobel, PPG Industries, Hempel, Tikkurila та інші, які пропонують широкий вибір систем фарбування для рухомого складу.

Однак традиційні покриття мають і певні недоліки. Зокрема, вони вимагають періодичного обслуговування, що включає оновлення захисного шару, усунення подряпин і відшарувань. Це призводить до збільшення витрат на експлуатацію та потребує простою транспортного засобу на час проведення робіт. Також термін служби традиційних покриттів обмежений у порівнянні з сучасними інноваційними рішеннями.

У порівнянні з самовідновлювальними покриттями, які здатні автоматично усувати мікропошкодження та мають значно довший термін служби без обслуговування, традиційні системи виглядають менш ефективними у довгостроковій перспективі. Проте на сьогодні саме вони залишаються основою у сфері обслуговування рухомого складу завдяки зрозумілій технології, низькій вартості та відповідності чинним технічним нормам.

У сучасних умовах зростає інтерес до інноваційних покриттів, які можуть автоматично відновлювати свою структуру після пошкоджень. Самовідновлювальні покриття – це інтелектуальні матеріали, які дозволяють продовжити термін служби конструкцій та знизити витрати на обслуговування. Їх порівняння з традиційними методами захисту (фарби, лаки, антикорозійні покриття) є важливим для визначення їх економічної доцільності.

Розвиток матеріалознавства та зростаючого попиту на довговічні й економічно ефективні рішення в галузі захисту поверхонь, значну увагу привертають самовідновлювальні покриття. Ці інноваційні матеріали здатні автоматично усувати мікропошкодження внаслідок фізичних або хімічних впливів, тим самим продовжуючи термін служби конструкцій і скорочуючи потребу в обслуговуванні. Порівняно з традиційними методами захисту, такими як фарбування, нанесення антикорозійних або декоративних покриттів, самовідновлювальні системи мають як переваги, так і виклики, зокрема у сфері вартості.

Початкова вартість виробництва традиційних покриттів є значно нижчою. Для їх створення зазвичай використовуються недорогі полімери, епоксидні смоли чи інші добре відпрацьовані технології, що дозволяє утримувати ціну в межах 5–15 доларів США за квадратний метр. Виробництво є масштабованим і широко доступним. У той же час самовідновлювальні покриття базуються на високотехнологічних рішеннях: мікрокапсулах, полімерних матрицях, наноматеріалах, здатних реагувати на тріщини або подряпини. Це потребує складного контролю за технологічними процесами та використання більш дорогих компонентів. У результаті вартість таких покриттів може становити від 30 до 100 доларів за квадратний метр, залежно від технології.

Однак головна перевага самовідновлювальних покриттів розкривається в процесі експлуатації. Традиційні захисні покриття потребують регулярного технічного обслуговування, повторного нанесення або ремонту кожні 2–5 років, що супроводжується високими витратами, часом простою обладнання або інфраструктури, а також людськими ресурсами. Натомість самовідновлювальні покриття здатні функціонувати до 10–20 років без суттєвих втручань, значно знижуючи частоту ремонтів та інспекцій. Таким чином, хоча початкові витрати на такі системи є високими, у довгостроковій перспективі вони здатні забезпечити суттєву економію, особливо в критичних сферах: нафтогазова промисловість, енергетика, транспортна інфраструктура.

Окрім економіки, слід також враховувати екологічні переваги: зменшення кількості ремонтів і повторних нанесень знижує викиди, витрати матеріалів і вплив на довкілля. Компанії, що впроваджують такі технології, також отримують репутаційні вигоди, демонструючи інноваційний та відповідальний підхід до експлуатації ресурсів.

На (рис. 3) бачимо графік, що ілюструє порівняння загальних витрат на традиційне та інноваційне самовідновлювальне покриття протягом 10 років. Видно, що хоча інноваційне покриття стартує з вищої вартості, темп зростання витрат у нього значно повільніший.

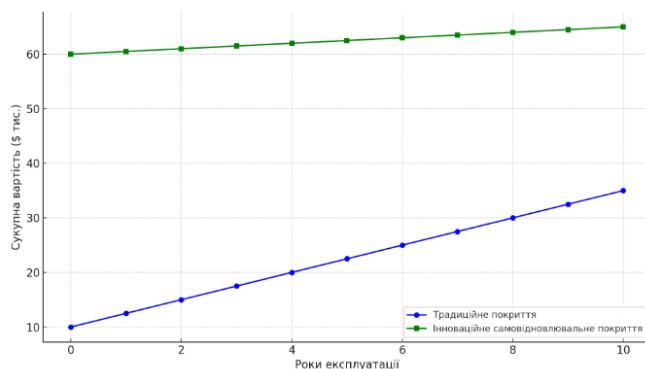


Рисунок 3 – Порівняння загальних витрат на покриття за 10 років

У підсумку, самовідновлювальні покриття – це інвестиція в майбутнє. Хоча сьогодні вони залишаються дорожчими у виробництві, їхнє впровадження може суттєво зменшити витрати на експлуатацію, підвищити довговічність і безпечність об'єктів, а також сприяти екологічній сталості. У міру здешевлення технологій та їх поширення очікується, що ці матеріали все частіше замінюватимуть традиційні рішення в промисловості та інфраструктурі.

Висновки. Дослідження самовідновлювальних матеріалів є перспективним напрямком у матеріалознавстві, оскільки вони можуть суттєво підвищити довговічність конструкцій. Сучасні покриття використовують різні механізми відновлення, такі як мікрокапсулювання, полімерні матриці з реагуючими компонентами або фотоактивні матеріали. Застосування таких покриттів у несівних елементах транспорту дозволить зменшити частоту ремонтів та знизити витрати на обслуговування.

Хоча самовідновлювальні матеріали мають вищу собівартість, їх використання окупається за рахунок збільшення терміну служби конструкцій. Особливо перспективними є покриття для рам, стоек і поясів стін та інших критичних вузлів, які піддаються високим навантаженням та корозії. У літаках такі матеріали можуть запобігати поширенню тріщин у несівних конструкціях транспортних засобів підвищуючи безпеку польотів.

Самовідновлювальні покриття можуть захистити несівні конструкції вагонів від вібраційних пошкоджень та агресивного впливу навколишнього середовища. Зменшення потреби в ремонтах та заміні деталей сприяє зниженню виробничих відходів і енерговитрат. Наразі основним бар'єром є складність масштабування технологій та їх адаптація до масового виробництва. Подальші дослідження мають спрямувати на оптимізацію складу покриттів та розробку нових методів їх нанесення.

Самовідновлювальні покриття мають значний потенціал для застосування в транспортній галузі, але їх широке впровадження потребує подальших наукових та інженерних розробок.

Література

1. T. Yimyai, D. Crespy, M. Rohwerder, (2023). Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Adv. Mater.* 35, 2300101. <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>
2. Yang, H., Bao, Y., Liu, C., Yu, S., Guo, R., Zhang, W. and Li, J. (2025). Innovative UV-Responsive Self-Healing Polyacrylate Coatings for Enhanced Durability in Functional Applications. *J Appl Polym Sci* e56962. <https://doi.org/10.1002/app.56962>
3. S.-M. Yang, S. Zhou, J.-Y. Yuan, *Chem. Eur. J.* (2025), 31, e202404038. <https://doi.org/10.1002/chem.202404038>
4. Q. Tang, C. Ji, G. Wei, J. Hu, F. Chang, B. Zhu, L. Ren, D. Peng, (2025). Microfluidic Electrospinning Core-Shell Nanofibers for Anti-Corrosion Coatings With Efficient Self-Healing Properties. *Adv. Sci.* 12, 2409751. <https://doi.org/10.1002/advs.202409751>
5. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
6. Kharaji, S. (2023). Self-Healing Coatings. *Intech Open*. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.109500>
7. Dehghani A, Aslani F, editors. (2019). *A Review on Defects in Steel Offshore Structures and Developed Strengthening Techniques*. Structures. London, United Kingdom: The Institution of Structural Engineers International HQ, Elsevier;
8. Chaves I, Melchers R. (2019). Coastal and offshore structures, wave and wind loading microstructural effect on the marine corrosion of low-carbon steel weldments. In: *Mechanics of Structures and Materials XXIV*. London, England: CRC Press; P. 898-903.
9. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. (2018). Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
10. 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*. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
11. 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). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
12. Kartsonakis, I. A., Kontiza, A., & Kanellopoulou, I. A. (2024). Advanced Micro/Nanocapsules for Self-Healing Coatings. *Applied Sciences*, 14(18), 8396. <https://doi.org/10.3390/app14188396>
13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. (2024). Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
14. Ubong Eduok, Enyinnaya Ohaeri, Jerzy Szpunar, (2020). Self-healing composite coatings with protective and anticorrosion potentials: classification by healing mechanism, Anish Khan, Mohammad Jawaid, Shiju N. Raveendran, Abdullah Mohammed Ahmed Asiri, In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Self-Healing Composite Materials*, Woodhead Publishing, P. 123-162, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00008-9>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128173541000089>)

15. Habib, S., Khan, A., Nawaz, M., Sliem, M. H. R., Shakoore, R. A., Kahraman, R., Abdullah, A. M., & Zekri, A. (2019). Self-Healing Performance of Multifunctional Polymeric Smart Coatings. *Polymers*, 11(9), 1519. <https://doi.org/10.3390/polym11091519>
16. Malekhouyan, Roya, Saied Nouri Khorasani, Rasoul Esmaeely Neisiany, Reza Torkaman, Mohammad Sadegh Koochaki, and Oisik Das. (2020). "Preparation and Characterization of Electrosprayed Nanocapsules Containing Coconut-Oil-Based Alkyd Resin for the Fabrication of Self-Healing Epoxy Coatings" *Applied Sciences* 10, no. 9: 3171. <https://doi.org/10.3390/app10093171>
17. Huang, L., Chen, W., Hao, W., Wang, J., Guo, X., Ma, L. and Zhang, D. (2024), Self-healing anti-corrosion coatings: A mechanism study using computational materials science. *Elec. Mat. and Applications*, 1: e12006. <https://doi.org/10.1049/ema3.12006>

References

1. T. Yimyai, D. Crespy, M. Rohwerder, (2023). Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Adv. Mater.* 35, 2300101. <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>
2. Yang, H., Bao, Y., Liu, C., Yu, S., Guo, R., Zhang, W. and Li, J. (2025). Innovative UV-Responsive Self-Healing Polyacrylate Coatings for Enhanced Durability in Functional Applications. *J Appl Polym Sci* e56962. <https://doi.org/10.1002/app.56962>
3. S.-M. Yang, S. Zhou, J.-Y. Yuan, *Chem. Eur. J.* (2025). 31, e202404038. <https://doi.org/10.1002/chem.202404038>
4. Q. Tang, C. Ji, G. Wei, J. Hu, F. Chang, B. Zhu, L. Ren, D. Peng, (2025). Microfluidic Electrospinning Core-Shell Nanofibers for Anti-Corrosion Coatings With Efficient Self-Healing Properties. *Adv. Sci.* 12, 2409751. <https://doi.org/10.1002/advs.202409751>
5. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
6. Kharaji, S. (2023). Self-Healing Coatings. *Intech Open*. doi: 10.5772/intechopen.109500
7. Dehghani A, Aslani F, editors. (2019). *A Review on Defects in Steel Offshore Structures and Developed Strengthening Techniques*. Structures. London, United Kingdom: The Institution of Structural Engineers International HQ, Elsevier;
8. Chaves I, Melchers R. (2019). Coastal and offshore structures, wave and wind loading microstructural effect on the marine corrosion of low-carbon steel weldments. In: *Mechanics of Structures and Materials XXIV*. London, England: CRC Press; P. 898-903
9. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. (2018). Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. P. 239-243. doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487>
10. 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*. Issue 5 (1), P.79-87. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
11. 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). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
12. Kartsonakis, I. A., Kontiza, A., & Kanellopoulou, I. A. (2024). Advanced Micro/Nanocapsules for Self-Healing Coatings. *Applied Sciences*, 14(18), 8396. <https://doi.org/10.3390/app14188396>
13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. (2024). Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
14. Ubong Eduok, Enyinnaya Ohaeri, Jerzy Szpunar, (2020). Self-healing composite coatings with protective and anticorrosion potentials: classification by healing mechanism, Anish Khan, Mohammad Jawaid, Shiju N. Raveendran, Abdullah Mohammed Ahmed Asiri, In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Self-Healing Composite Materials*, Woodhead Publishing, P. 123-162, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00008-9>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128173541000089>)
15. Habib, S., Khan, A., Nawaz, M., Sliem, M. H. R., Shakoore, R. A., Kahraman, R., Abdullah, A. M., & Zekri, A. (2019). Self-Healing Performance of Multifunctional Polymeric Smart Coatings. *Polymers*, 11(9), 1519. <https://doi.org/10.3390/polym11091519>
16. Malekhouyan, Roya, Saied Nouri Khorasani, Rasoul Esmaeely Neisiany, Reza Torkaman, Mohammad Sadegh Koochaki, and Oisik Das. (2020). "Preparation and Characterization of Electrosprayed Nanocapsules Containing Coconut-Oil-Based Alkyd Resin for the Fabrication of Self-Healing Epoxy Coatings" *Applied Sciences* 10, no. 9: 3171. <https://doi.org/10.3390/app10093171>
17. Huang, L., Chen, W., Hao, W., Wang, J., Guo, X., Ma, L. and Zhang, D. (2024). Self-healing anti-corrosion coatings: A mechanism study using computational materials science. *Elec. Mat. and Applications*, 1: e12006. <https://doi.org/10.1049/ema3.12006>

The paper discusses modern trends and prospects for the implementation of self-healing coatings in the load-bearing structures of vehicles. Special attention is given to innovative polymer-based materials with embedded microcapsules, thermo- and photo-sensitive

components capable of autonomously repairing micro-damages. The mechanisms of self-healing are analyzed, including chemical regeneration, physicomaterial "closure" of cracks, as well as the potential use of nanomaterials. The application of such coatings in load-bearing elements (body panels, subframes, auxiliary frames) significantly reduces the degradation rate of materials, extends the service life of structures, and lowers maintenance costs. The challenges related to the long-term stability of these coatings under harsh operating conditions are discussed, along with possible solutions. It is concluded that the development of self-healing technologies opens new horizons for improving the reliability, safety, and environmental sustainability of vehicles. The article examines modern self-healing materials and technologies used in mechanical engineering. Particular focus is given to polymer composites with microencapsulated reagents, shape memory alloys, and self-healing coatings based on thermo- and photo-sensitive polymers. The principles of their operation are described, including re-crosslinking reactions, capsule-based regeneration, and thermal "shape memory." Examples of their use in vehicle structural elements, high-wear components, and protective coating systems are provided. The main advantages of implementing such materials are highlighted: reduced operational costs, increased durability of components, decreased maintenance needs, and enhanced safety. Development prospects include the integration of bioengineering technologies and "smart" materials with active monitoring and self-repair functions. This paper discusses the main requirements for self-healing protective coatings designed for the load-bearing structures of freight cars. Taking into account the specifics of railway vehicle operation, a set of functional, mechanical, climatic, and technological criteria has been formulated, which innovative coatings with self-healing properties must meet. The focus is on the use of polymer composites. The justification for key parameters such as adhesion, corrosion resistance, wear resistance, heat resistance, hydrophobicity, and their impact on the operational reliability of freight cars is provided. The proposed requirements can be used in the development of new materials, technical regulations, and standards for the railway industry. Self-healing materials are considered a key element of the strategy for sustainable engineering in the future.

Key words: transport, mechanics, wagons, transportation technologies, computer modeling, engineering graphics, self-healing protective coatings.

Фомін О. В. д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, fominaleksejvictorovic@gmail.com

Козинка О. С. аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, kozynka1520mm@gmail.com

Лопатюк С. П. к.т.н., доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін, Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, lopatuk2@gmail.com

Красулін О. С. старший викладач кафедри «Транспортні технології підприємств», «Приазовський державний технічний університет», krasulin2@gmail.com

Харченко Т. В. старший викладач кафедри «Транспортних технологій», Національний університет «Запорізька політехніка», fraychik@ukr.net