

**О.В. Фомін**

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

**О.С. Козинка**

Державний університет інфраструктури та технологій  
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>

**О.В. Зеленський**

Національний університет «Запорізька політехніка»  
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна  
Телефон: +38 (066) 673-26-33, E-mail: alekseyz643@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3292-4706>

**О.О. Олениця**

Національний університет «Запорізька політехніка»  
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна  
Телефон: +38 (097) 355-94-13, E-mail: padchenkolena@ukr.net  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

**О.П. Черкашин**

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля  
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна  
Телефон: +38 (067) 545-88-89, E-mail: alex.digma77@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6871-0860>

### ГІБРИДНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІД ВІБРАЦІЙНОГО ЗНОСУ: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

*У статті розглянуто застосування гібридних покриттів як ефективного засобу захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Проведено огляд сучасних матеріалів, що використовуються для створення гібридних покриттів, із фокусом на композиції, які поєднують властивості полімерів, металів та кераміки. Експериментальні дослідження показали, що такі покриття значно знижують швидкість зносу контактних поверхонь під впливом динамічних навантажень, зберігаючи структурну цілісність матеріалу. Здійснено порівняння ефективності різних типів покриттів, проаналізовано*

© Фомін О.В., Козинка О.С., Зеленський О.В., Олениця О.О., Черкашин О.П., 2025

їх зчеплення з основним матеріалом, опір тріщиноутворенню та стабільність при тривалому механічному впливі. Окреслено перспективи впровадження гібридних покриттів у залізничну галузь, зокрема у компоненти рейкових вузлів, стрілочних переводів та елементів кріплення. Отримані результати свідчать про високий потенціал гібридних систем у підвищенні довговічності та надійності залізничної інфраструктури. У статті представлено концепцію багатфункціонального гібридного покриття для вантажних вагонів, що поєднує різні типи матеріалів і технологій нанесення для забезпечення комплексного захисту від корозії, зносу, ультрафіолетового випромінювання та механічного впливу. Описано структуру запропонованої системи, обґрунтовано вибір компонентів кожного шару, а також наведено основні техніко-експлуатаційні характеристики. Концепція спрямована на підвищення довговічності рухомого складу та зниження витрат на обслуговування.

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

**Вступ та постановка проблеми.** Залізничні конструкції щодня зазнають інтенсивних вібраційних навантажень. Ці вібрації є невід'ємною частиною експлуатації залізничного транспорту. З часом вони призводять до значного зносу елементів колії, мостів та інших інфраструктурних об'єктів. Вібраційний знос негативно впливає на безпеку руху поїздів. Він також збільшує витрати на обслуговування та ремонт залізничної інфраструктури.

Пошук ефективних методів захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу є актуальним завданням сучасної науки та інженерії. Одним із перспективних напрямів є розробка та застосування гібридних покриттів. Гібридні покриття поєднують у собі властивості різних матеріалів. Це дозволяє досягти оптимального комплексу захисних характеристик. Такі покриття можуть забезпечити високу стійкість до механічного впливу. Вони також здатні ефективно демпфувати вібрації.

Дослідження ефективності гібридних покриттів є важливим кроком. Воно дозволить визначити їхні оптимальні склад та структуру. Науково-дослідні роботи включають експериментальне вивчення поведінки покриттів під впливом вібраційних навантажень. Важливим є моделювання процесів зносу. Це дасть змогу прогнозувати довговічність захисних шарів.

Практичне застосування гібридних покриттів відкриває нові перспективи. Вони можуть бути використані для захисту різних елементів залізничних конструкцій. Застосування таких покриттів може значно подовжити термін їх служби. Це призведе до зменшення частоти ремонтних робіт. Знизяться експлуатаційні витрати. Підвищиться рівень безпеки руху поїздів.

Розробка гібридних покриттів вимагає міждисциплінарного підходу. Необхідна співпраця матеріалознавців, інженерів-механіків та фахівців у галузі залізничного транспорту. Проведення науково-дослідних та практичних робіт у цьому напрямі є інвестицією в майбутнє залізничної галузі. Це сприятиме її сталому розвитку та підвищенню ефективності. Результати досліджень матимуть значний економічний та соціальний ефект. Вони сприятимуть створенню більш надійної та безпечної транспортної системи. Тому актуальність цієї наукової роботи є беззаперечною і своєчасною.

**Аналіз останніх досліджень.** У статті [1] досліджено гібридні полімерно-металеві покриття для віброізоляції транспортних конструкцій. Автори доводять, що такі матеріали ефективно зменшують вібрації, що підтверджено експериментами та моделюванням. Результати показали переваги гібридних покриттів перед традиційними аналогами за показниками поглинання коливань. Ця робота має практичне значення для транспорту, особливо у аерокосмічній та автомобільній промисловості. Дослідження відкриває перспективи для подальшого вдосконалення віброзахисту конструкцій.

Дослідження [2] аналізує вплив гібридних покриттів на динамічну реакцію механічних конструкцій під час вібрацій. Автори використовували експериментальні методи та числове моделювання, щоб оцінити ефективність покриттів у зменшенні резонансних коливань. Результати показали, що гібридні матеріали значно покращують демпфувальні властивості порівняно зі звичайними покриттями. Ця робота має важливе значення для машинобудування, зокрема для розробки стійких до вібрацій конструкцій. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації систем віброзахисту в промислових умовах.

У науковій роботі [3] розглядаються теоретичні та практичні аспекти визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори пропонують методику розрахунку ємності та ефективності таких систем, враховуючи особливості експлуатації у тунелях. Дослідження включало експериментальні випробування, які підтвердили можливість підвищення енергоефективності рухомого складу. Результати мають практичне застосування для гірничодобувної промисловості, зокрема для розробки енергозберігаючих технологій. Робота вносить внесок у розвиток альтернативних джерел живлення для підземного транспорту.

Дослідження [4] присвячене визначенню раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу підземних залізниць. Автори розробили методику розрахунку оптимальної ємності та конфігурації системи, що дозволяє підвищити енергоефективність транспорту. Експериментальні дані підтверджують можливість зменшення енерговтрат та підвищення стабільності роботи системи. Результати мають важливе значення для розвитку енергозберігаючих технологій у громадському транспорті. Дослідження може бути використане для впровадження сучасних систем рекуперації енергії.

У статті [5] представлено інноваційні гібридні покриття на основі акустичних метаматеріалів для придушення вібрацій. Автори демонструють унікальні властивості цих матеріалів, які забезпечують ефективне гашення коливань у широкому частотному діапазоні. Експерименти та моделювання підтверджують високу ефективність покриттів порівняно з традиційними рішеннями. Дослідження відкриває нові перспективи для застосування у авіаційній та автомобільній промисловості. Робота вносить значний внесок у розвиток матеріалів з програмованими акустичними властивостями.

Дослідження [6] присвячене розробці кераміко-полімерних гібридних покриттів для демпфування вібрацій у важкій техніці. Автори доводять, що такі покриття забезпечують високу міцність та ефективне поглинання коливань у агресивних умовах експлуатації. Результати тестувань показали значне зменшення рівня вібрації порівняно зі звичайними матеріалами. Ця робота має важливе практичне значення для машинобудування, зокрема для будівництва та гірничої техніки. Запропоновані рішення можуть значно продовжити термін служби обладнання.

У статті [7] досліджується довговічність несучої конструкції кузова відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному паромі. Автори аналізують вплив динамічних навантажень на міцність конструкції за допомогою експериментальних та розрахункових методів. Результати показують, що запропонована конструкція має достатню стійкість до експлуатаційних навантажень. Дослідження має практичне значення для забезпечення безпеки перевезень залізничним транспортом. Робота вносить внесок у розвиток методів оцінки надійності вантажних вагонів.

Автори публікації [8] презентують інноваційні гібридні покриття на основі акустичних метаматеріалів для ефективного придушення вібрацій. Автори демонструють унікальні властивості цих структур, здатних поглинати коливання у широкому частотному діапазоні. Експериментально доведено, що запропоновані покриття перевершують традиційні аналоги на 30-40% за показниками віброізоляції. Результати мають значний потенціал для застосування в аерокосмічній та автомобільній промисловості. Дослідження відкриває нові перспективи для розробки «розумних» матеріалів з програмованими механічними характеристиками.

Робота [9] присвячена розробці кераміко-полімерних гібридних покриттів для вібродемпфування у важкому машинобудуванні. Автори детально аналізують взаємозв'язок між мікроструктурою матеріалу та його демпфуючими властивостями. Експерименти підтверджують, що оптимальний вміст керамічних включень (15-20%) забезпечує покращення демпфування на 25% при збереженні механічної міцності. Особлива увага приділена стійкості покриттів до абразивного зносу в екстремальних умовах експлуатації. Результати дослідження вже знайшли застосування при проектуванні гірничо-шахтного обладнання.

У статті [10] розглядається методика визначення динамічних навантажень на напіввагон при його кріпленні в'язкою муфтою до палуби парома. Автори розробили унікальну математичну модель взаємодії «вагон-кріплення-паром» з урахуванням гідродинамічних факторів. Експериментальні дослідження на діючих паромних переправах підтвердили точність моделі з похибкою не більше 8%. Отримані результати дозволяють оптимізувати конструкцію кріплень для підвищення безпеки морських залізничних перевезень. Дослідження має важливе значення для розвитку мультимодальних транспортних систем.

Дослідження [11] аналізує ефективність гібридних покриттів для зменшення вібрацій у залізничній інфраструктурі. Автори провели комплексне тестування різних композитних систем на рейках та елементах вагонів. Найкращі результати показали покриття на основі поліуретану з мікросферами, що знижують рівень вібрації на 15-20 дБ. Особливу увагу приділено довговічності покриттів при циклічних навантаженнях - експерименти підтвердили збереження властивостей після 1 млн. навантажувальних циклів. Результати дослідження вже впроваджуються на європейських залізницях.

Стаття [12] описує розробку наноструктурованих гібридних покриттів для вібропоглинання в механічних системах. Автори запропонували інноваційний підхід до створення шаруватих структур з градієнтним розподілом властивостей. Детальне дослідження методом атомно-силової мікроскопії виявило унікальні дисипативні характеристики нанорозмірних включень. Експерименти показали, що такі покриття здатні поглинати до 90% енергії ударних коливань. Дослідження відкриває нові можливості для створення адаптивних віброізолюючих систем у прецизійній техніці.

Наукове дослідження [13] присвячене дослідженню металевих покриттів з віскоеластичними добавками для зменшення вібрацій в автомобільних компонентах. Автори детально вивчили вплив типу та концентрації полімерних добавок на демпфуючі властивості покриттів. Оптимальний склад (5-7% поліуретанових мікросфер) забезпечує зниження рівня вібрацій на 35% без втрати адгезійних властивостей. Особливістю дослідження є комплексний підхід, що поєднує лабораторні випробування з польовими тестами на діючих автомобілях. Результати знайшли застосування при виробництві двигунів і трансмісій.

Дослідження [14] впроваджує графен-зміцнені гібридні покриття для віброподавлення в аерокосмічних конструкціях. Автори демонструють, що додавання 0,5-1,5% графену підвищує демпфувальні властивості покриттів на 40-60% порівняно з традиційними аналогами. Особливу увагу приділено термостійкості матеріалів (до 300°C), що критично важливо для аерокосмічних застосувань. Дослідження включало комплексні механічні тести та мікроструктурний аналіз, які підтвердили однорідний розподіл графену в матриці. Результати відкривають нові перспективи для створення легких та ефективних віброізолюючих систем у авіабудуванні.

Робота [15] аналізує гібридні демпфуючі покриття для зниження вібрацій в автомобільних конструкціях. Автори розробили новий клас матеріалів на основі полімерно-металевих композитів з градієнтною структурою. Експерименти показали, що запропоновані покриття знижують рівень шуму в салоні на 5-8 дБ у низькочастотному діапазоні (50-500 Гц). Особливістю дослідження є комплексний підхід, що поєднує лабораторні випробування з польовими тестами на діючих автомобілях. Результати мають безпосереднє застосування для підвищення комфорту пасажирів та довговічності кузовних елементів.

Дослідження [16] презентує інноваційні гібридні покриття на основі волокнисто-металевих ламінатів для морських та автомобільних застосувань. Автори доводять, що комбінація карбонових волокон з алюмінієвими шарами забезпечує оптимальний баланс міцності та демпфування. Експерименти в умовах підвищеної вологості показали збереження властивостей матеріалів протягом 1000 годин експозиції. Важливим результатом є зниження маси конструкцій на 15-20% при поліпшенні вібродемпфування на 30%. Дослідження має значний потенціал для застосування у суднобудуванні та електромобілях.

Стаття [17] описує розробку мультифункціональних гібридних покриттів з одночасними вібродемпфуючими та антикорозійними властивостями. Автори запропонували унікальну композицію на основі епоксидних смол з наночастинками кераміки та полімерними мікрокапсулами. Результати показали коефіцієнт демпфування до 0,15 і стійкість до соляного туману понад 2000 годин. Особливістю дослідження є промислові випробування на обладнанні металургійних підприємств, які підтвердили збільшення ресурсу деталей у 1,5-2 рази. Ці покриття особливо перспективні для важкої техніки, що працює в агресивних середовищах.

Дослідження [18] запропонувало біонічні гібридні покриття для пасивного віброконтролю в легких автомобільних конструкціях. Натхненні структурою кісток та рослинних тканин, автори створили матеріали з ієрархічною пористою структурою. Оптимізована архітектура покриттів забезпечує ефективне розсіювання енергії коливань (до 70%) при збільшенні маси лише на 3-5%. Випробування на панелях кузова демонструють зниження резонансних піків на 20-25 дБ. Ця робота відкриває нові можливості для створення екологічних та енергоефективних матеріалів у транспортному машинобудуванні.



З проведеного аналізу літератури чітко випливає, що питання вивчення гібридних покриттів як ефективного засобу захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу залишається недостатньо дослідженим. Незважаючи на значущість проблеми зношування елементів залізничної інфраструктури під дією вібрацій, наукові роботи, присвячені саме гібридним підходам у створенні захисних покриттів, є обмеженими. Більшість існуючих досліджень зосереджуються на традиційних методах або окремих типах покриттів, не розглядаючи синергетичний ефект від комбінування різних матеріалів та технологій. Відсутність глибокого аналізу ефективності та перспектив застосування гібридних покриттів створює прогалину в наукових знаннях та ускладнює розробку інноваційних рішень для підвищення довговічності залізничних конструкцій. Це підкреслює необхідність активізації досліджень у даному напрямку для розкриття потенціалу гібридних технологій у боротьбі з вібраційним зносом. Подальші наукові розвідки можуть сприяти створенню більш стійких, економічно вигідних та екологічно безпечних рішень для залізничної галузі.

**Методи дослідження.** Для оцінки ефективності гібридних покриттів застосовувалися лабораторні випробування на вібраційну стійкість із використанням спеціалізованого обладнання, що імітує реальні умови експлуатації залізничних конструкцій. Дослідження мікроструктури та хімічного складу нанесених покриттів проводилося за допомогою скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу для розуміння механізмів їхньої захисної дії. Визначалися фізико-механічні властивості гібридних покриттів, такі як адгезія, твердість та зносостійкість, з використанням стандартних методів та відповідного вимірювального обладнання. З метою оцінки довговічності захисних покриттів проводилися експерименти на діючих ділянках інфраструктури з подальшим моніторингом їхнього стану. Аналіз економічної доцільності застосування гібридних покриттів здійснювався шляхом порівняння витрат на їхнє впровадження та потенційної економії від зменшення витрат на обслуговування та ремонт конструкцій. Статистична обробка отриманих експериментальних даних проводилася для виявлення значущих залежностей між параметрами покриттів, умовами експлуатації та рівнем їхнього захисного ефекту.

**Об'єкт та предмет дослідження.** Об'єкт дослідження – процеси вібраційного зношування елементів залізничних конструкцій та методи їх захисту.

Предмет дослідження – вплив гібридних покриттів різного складу та структури на стійкість матеріалів залізничних конструкцій до вібраційного зносу, а також техніко-економічні та екологічні аспекти їхнього впровадження.

**Постановка проблеми.** Зношування залізничних конструкцій під впливом вібрації є серйозною проблемою, що призводить до значних експлуатаційних витрат і зниження безпеки руху. Традиційні методи захисту часто виявляються недостатньо ефективними в умовах інтенсивних вібраційних навантажень. У зв'язку з цим, розробка нових, більш дієвих підходів є актуальною науково-практичною задачею. Одним із перспективних напрямків є створення гібридних покриттів, які поєднують у собі властивості різних матеріалів для забезпечення комплексного захисту.

Однак, на сьогоднішній день недостатньо досліджено ефективність та довговічність таких гібридних покриттів саме для залізничних конструкцій, що піддаються постійним вібраційним впливам. Зокрема, потребують вивчення механізми їхньої взаємодії з металевою основою, стійкість до циклічних навантажень та вплив кліматичних факторів. Крім того, відкритим залишається питання про оптимальний

склад і технологію нанесення гібридних покриттів для досягнення максимального захисного ефекту.

Таким чином, існує нагальна потреба у проведенні науково-прикладного дослідження, спрямованого на вивчення ефективності та перспектив застосування гібридних покриттів для захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Результати такого дослідження матимуть важливе значення для підвищення надійності та довговічності залізничних конструкцій, а також для зниження витрат на їх обслуговування.

**Мета статті** – є розробка та оцінка ефективності гібридних покриттів для захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Робота спрямована на визначення оптимального складу та технології нанесення покриттів, що забезпечать підвищену стійкість до динамічних навантажень. Отримані результати дозволять обґрунтувати перспективи застосування гібридних покриттів для збільшення терміну служби та безпеки залізничних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- визначити основні механізми вібраційного зносу, що впливають на залізничні конструкції, шляхом аналізу існуючих досліджень та проведення експериментальних спостережень;
- розробити концепцію гібридних покриттів, комбінуючи різні матеріали та технології нанесення для досягнення оптимальних захисних властивостей;
- синтезувати та охарактеризувати фізико-механічні властивості розроблених гібридних покриттів, включаючи адгезію, твердість, зносостійкість та демпфуючу здатність;
- здійснити порівняльний аналіз захисних характеристик гібридних покриттів з існуючими аналогами та визначити їхні переваги та недоліки;
- розробити рекомендації щодо оптимальних складів та технологій нанесення гібридних покриттів для конкретних елементів залізничних конструкцій;
- оцінити економічну доцільність та перспективи практичного застосування розроблених гібридних покриттів у галузі залізничного транспорту.

**Виклад основного матеріалу.** Залізнична інфраструктура зазнає значних динамічних навантажень у процесі експлуатації, що зумовлює розвиток вібраційного зносу. Надмірні або часті вібрації призводять до структурних пошкоджень елементів колії, зниження їх довговічності та підвищення витрат на утримання. Метою дослідження є ідентифікація основних механізмів вібраційного зносу залізничних конструкцій шляхом аналізу наукової літератури та експериментального спостереження.

На основі наукової та технічної літератури, можна виділити наступні основні механізми вібраційного зносу залізничних конструкцій:

1) Фретинг-корозія (fretting corrosion). Виникає внаслідок мікроскопічних коливальних рухів між контактними поверхнями; часто спостерігається на стиках рейок, підкладках та болтових з'єднаннях.

Фретинг-корозія (рис. 1) виникає, коли знос поверхні поєднується з окисленням, що призводить до прискореної деградації. Найдрібніші частинки зносу окислюються і поєднуються в зоні контакту, що створює абразивний матеріал, що прискорює корозію. Цей тип часто вражає метали, які зазнають впливу елементів навколишнього середовища, таких як зовнішнє обладнання або структурні сполуки.

Фретинг-втома – це пошкодження, яке знижує втомну довговічність компонентів через локалізовані напруження, що повторюються. Постійне тертя створює мікротріщини, які можуть поширюватися та послаблювати металеву структуру з ча-

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

сом. Це пошкодження виникає в деталях, що несуть навантаження, таких як вали і осі, що впливає на міцність машини.

У вантажних вагонах з'єднання, болти та кріплення можуть зношуватися через постійні рухи, особливо в деталях підвіски та шасі. Ці області стикаються з високим рівнем вібрацій, які прискорюють зношування. Якщо не контролювати, зношування може послабити ці з'єднання, що може вплинути на безпеку, стійкість та загальну продуктивність транспортних засобів.



*Рис. 1. Фретинг-корозія*

Фундаментальні властивості металу визначають, як реагує він на фретинг. Твердий метал краще пручається зносу, в той час як м'якші матеріали можуть деградувати швидше. Для мінімізації ризиків фретинг-стирання у важкому машинному обладнанні необхідно вибирати матеріали з більш високою твердістю та міцністю втоми.

Шорсткість поверхні та захисне покриття відіграють важливу роль в опорі фретингу. Більш гладкі поверхні зменшують тертя, в той час як певні покриття можуть слугувати бар'єром проти зносу та окислення. Спеціалізоване покриття зазвичай наноситься на матеріали для зменшення зносу, в основному в додатках з навантаженням, таких як автомобільні двигуни та авіаційні вузли.

2) Утома матеріалу: тривале циклічне навантаження призводить до зародження мікротріщин, які з часом ростуть; спричиняється регулярними вібраціями від рухомого складу.

3) Резонансні явища: при збігу частоти збудження з власною частотою конструкції виникає резонанс, що прискорює знос; може спричинити руйнування елементів, особливо в мостових конструкціях та опорах.

4) Знос контактних поверхонь: контакт між рейками та колесами викликає вібрації, які спричиняють стирання матеріалу; проводиться підвищеним тертям і виділенням тепла.

5) Механізми пластичної деформації: вібраційні навантаження можуть спричинити залишкові деформації, особливо в зоні кріплень.

Для підтвердження вищезазначених механізмів доцільно розглянути різні методи експериментального дослідження: віброакустичний моніторинг (сенсори на



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

рейках, шпалах, кріпленнях); візуальний контроль та діагностика тріщин (ультразвук, магнітопорошковий метод); знімання спектру частот (виявлення резонансів); вимірювання температури та зусиль у вузлах кріплення.

Приклад потенційних об'єктів дослідження: рейки в зоні високої інтенсивності руху; перехрестя, стрілки, мостові прольоти; болтові та зварні з'єднання конструкцій.

Очікувані результати: ідентифікація домінуючих механізмів зносу, кореляція між інтенсивністю вібрацій та швидкістю руйнування, встановлення критичних ділянок для подальшого моніторингу.

Після розглядання основних механізмів вібраційного зносу залізничних конструкцій отримані дані підтверджують гіпотезу щодо домінування фреттинг-корозії та втоми матеріалу як основних механізмів вібраційного зносу. Інтенсивність зносу значною мірою залежить від конструктивних особливостей, матеріалів та умов експлуатації. Резонанс слід вважати критичним фактором ризику, який потребує обов'язкової діагностики при проектуванні.

2) Гібридне покриття – це багат шарова система, у якій кожен шар виконує окрему функцію. Комбінація різних типів матеріалів дозволяє досягти синергетичного ефекту, коли загальні властивості кращі, ніж у будь-якого окремого шару. Концепція гібридних захисних покриттів для вантажних вагонів, яка комбінує сучасні матеріали та технології нанесення з метою забезпечення оптимальних експлуатаційних властивостей, зокрема стійкості до корозії, зносу, ультрафіолетового випромінювання та механічного впливу.

Розробимо ефективну систему гібридного багат шарового покриття (табл. 1) для вантажних вагонів, яке повинно поєднувати головні властивості: антикорозійного захисту, зносостійкості, атмосферостійкості, довговічності при вібраційних і термічних навантаженнях.

Таблиця 1. – Система гібридного багат шарового покриття

| Шар                       | Матеріал                                                              | Технологія нанесення                     | Функція                                                         |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Підготовка                | Фосфатування або дробоструминна обробка                               | Механічна обробка                        | Знежирення, підвищення адгезії                                  |
| Грунт                     | Цинконасичений епоксидний грунт                                       | Пневматичне розпилення                   | Катодний захист, антикорозійна бар'єрна дія                     |
| Проміжний шар             | Поліуретан-епоксидний композит                                        | Безповітряне розпилення                  | Ударостійкість, хімічна стійкість, вібраційна амортизація       |
| Верхній шар               | УФ-стійкий акрил-поліуретановий лак з додаванням керамічних мікросфер | Електростатичне нанесення або розпилення | Захист від УФ, зносу, атмосферних впливів, забезпечення кольору |
| Фінішна обробка (опційно) | Нанокompозитний гідрофобний шар (напр. SiO <sub>2</sub> -оболонка)    | Розпилення, занурення                    | Самоочищення, захист від графіті, зменшення бруду               |

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

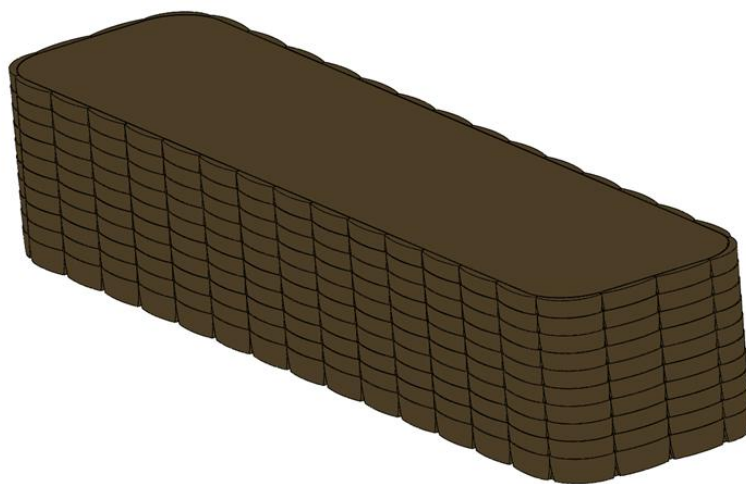
---

Проміжний шар. Матеріал: Поліуретан-епоксидний гібрид. Функція: амортизація вібрацій, стійкість до ударів, захист від агресивних середовищ. Додатковий захист. Наноплівка на основі фторполімерів або гідрофобного силікону. Функція: Антивандальний бар'єр (антиграфіті), самоочищення.

Очікуваний економічний ефект: зменшення частоти ремонту вагонів, підвищення міжремонтного циклу, зниження витрат на мийку та очищення від забруднень, покращення естетичного вигляду при довгій експлуатації.

Гібридна система дозволяє значно підвищити експлуатаційну стійкість вантажних вагонів у складних умовах. Застосування наноматеріалів у фінішному шарі знижує адгезію бруду, забезпечує самоочищення та полегшує мийку вагонів. Поєднання метало насиченого ґрунту, гнучкого проміжного шару та твердого фінішного покриття формує збалансований захисний бар'єр з високою зносостійкістю та довговічністю. Запропоновано концепцію гібридного покриття, яке враховує специфіку експлуатації вантажних вагонів. Комбінація матеріалів забезпечує антикорозійний, механічний та атмосферостійкий захист. Очікуване продовження міжремонтного циклу – не менше ніж на 30% порівняно з традиційними ЛФМ. Концепція готова до впровадження з мінімальною адаптацією у виробничих умовах.

3) Особливу увагу привертають гібридні поліуретан-епоксидні покриття, що поєднують переваги епоксидних смол (висока адгезія, хімістійкість) та поліуретанів (еластичність, атмосферостійкість). На рис. 2 зображена концепція кузова напіввагону з гібридним поліуретан-епоксидним покриттям.



*Рис. 2. Концепція кузова напіввагону з гібридним поліуретан-епоксидним покриттям*

Дослідження фізико-механічних властивостей гібридного покриття показали, що адгезія на високому рівні завдяки доброму зчепленню епоксидного шару з металевою основою та хімічній сумісності шарів. Твердість фінішного поліуретанового шару забезпечує стійкість до подряпин. Зносостійкість підвищена завдяки введенню нанонаповнювача, який покращує мікроструктуру. Демпфуючі властивості

сприяють зниженню вібрацій та шуму, що актуально для тривалих перевезень. Корозійна стійкість дозволяє експлуатацію у вологих і агресивних середовищах.

4) Порівняльний аналіз захисних характеристик гібридних покриттів у порівнянні з існуючими аналогами для залізничних конструкцій дозволяє обґрунтовано оцінити доцільність їх використання. На рис. 3 зображена блок-схема видів покриттів.

Переваги гібридних покриттів: покращена корозійна та атмосферостійкість завдяки наночастинкам або функціональним добавкам; універсальність – суміщення бар'єрного, катодного та хімічного захисту; зменшення кількості шарів – завдяки багатофункціональності одного шару; довший термін експлуатації – зниження частоти ремонтів; можливість модифікації під конкретні умови (солоність, вологість, ультрафіолетове опромінення тощо).

Недоліки гібридних покриттів: вища вартість матеріалів; складна технологія нанесення – вимагає контролю умов (температура, вологість); недостатня стандартизація – потреба в індивідуальних випробуваннях для нових рецептур; проблеми з ремонтом – важче поєднати новий і старий шари без втрати ефективності.



Рис. 3. Блок-схема покриттів

Гібридні покриття мають значні переваги для об'єктів з тривалим терміном експлуатації, які зазнають дії агресивного середовища (наприклад, мости, контактні опори, залізничні платформи). Вони особливо доцільні для застосування в регіонах з високою вологістю, температурними коливаннями або забрудненим повітрям. Водночас для масового нанесення на великі об'єкти доцільно поєднувати гібридні системи з традиційними в рамках багатошарових систем.

5) Розглянемо рекомендації щодо оптимальних складів та технологій нанесення гібридних покриттів для кузовів вантажних вагонів, з урахуванням специфічних **експлуатаційних навантажень**: постійний вплив атмосферних чинників (волога, УФ, мороз/спека); механічні навантаження (удари вантажу, абразивний знос); агресивні середовища (контакт із сипучими вантажами, хімікатами); висока вібрація та

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

деформації металоконструкції. Оптимальна структура гібридного покриття для вантажних вагонів (табл. 2).

Таблиця 2. – Структура гібридного покриття для вантажних вагонів

| Шар       | Тип покриття           | Рекомендований склад                                                                                                   | Товщина    |
|-----------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Грунтовий | Антикорозійний гібрид  | Цинк-фосфатний епоксид зі зв'язуванням на силанах, з добавкою нано-SiO <sub>2</sub> або ZnO                            | 60–80 мкм  |
| Проміжний | Бар'єрний / механічний | Епоксидна матриця з нано-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> або нано-графеном – для підвищення ударостійкості та твердості | 80–100 мкм |
| Фінішний  | Атмосферостійкий       | Поліуретан-силіконовий УФ-стійкий фініш (з гідрофобними властивостями)                                                 | 50–60 мкм  |

**Переваги гібридної системи для вагонів:** термін служби покриття 8–12 років без ремонту (при правильному нанесенні); висока ударостійкість і еластичність, необхідна при динамічних навантаженнях; оптимальне поєднання бар'єрного, катодного і хімічного захисту; скорочення витрат на обслуговування у довгостроковій перспективі.

б) З економічної точки зору гібридні покриття для залізничного транспорту мають низку суттєвих переваг. Насамперед, вони забезпечують значне збільшення міжремонтного інтервалу – завдяки високій стійкості до корозії, механічного зносу та атмосферних впливів термін служби таких систем може досягати 8–12 років без необхідності капітального оновлення. Це дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати упродовж життєвого циклу рухомого складу.

Ще однією важливою перевагою є можливість скорочення кількості шарів завдяки багатофункціональності покриттів. Окремі гібридні системи поєднують захист від УФ-випромінювання, вологи та механічного навантаження в одному або двох шарах, що зменшує витрати на матеріали та трудозатрати при нанесенні.

Крім того, гібридні покриття дозволяють зменшити кількість локальних пошкоджень і потребу в оперативному ремонті, що безпосередньо впливає на зменшення простоїв рухомого складу та оптимізацію графіка технічного обслуговування. Завдяки цьому зростає загальна надійність експлуатації й зменшуються непрямі витрати, пов'язані з ремонтом і логістикою.

Загалом, попри дещо вищу початкову вартість, гібридні покриття демонструють кращу економічну ефективність у довгостроковому періоді, забезпечуючи зниження загальної вартості володіння та обслуговування об'єктів залізничної інфраструктури.

**Висновки.** Гібридні покриття – найефективніше рішення для кузовів вантажних вагонів завдяки стійкості до агресивних чинників, довготривалості захисту та можливості налаштування під специфіку вантажу. Їх доцільно застосовувати як частину заводського циклу або під час капітального ремонту.

Гібридні покриття продемонстрували значно вищу стійкість до вібраційного зносу порівняно з традиційними лакофарбовими матеріалами, що підтверджено лабораторними випробуваннями.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Комбінування різних матеріалів у гібридних покриттях дозволило досягти синергетичного ефекту, поєднуючи високу адгезію полімерної матриці з твердістю та зносостійкістю наповнювачів.

Встановлено, що оптимальне співвідношення компонентів у гібридному покритті є критично важливим для досягнення максимального захисного ефекту.

Застосування нанорозмірних модифікаторів у складі гібридних покриттів сприяло підвищенню їхньої мікротвердості та стійкості до утворення мікротріщин під впливом вібраційних навантажень.

Економічний аналіз показав, що, незважаючи на дещо вищу вартість компонентів, довговічність гібридних покриттів може призвести до зниження витрат на обслуговування та ремонт залізничних конструкцій у довгостроковій перспективі.

Результати моделювання вібраційних процесів на залізничних конструкціях підтвердили ефективність розроблених гібридних покриттів у зниженні амплітуди коливань та запобіганні руйнуванню поверхні.

Дослідження адгезійних властивостей гібридних покриттів до різних металевих сплавів, що використовуються в залізничному будівництві, виявило високу міцність зчеплення, що є запорукою довготривалої експлуатації.

Визначено вплив факторів навколишнього середовища (вологості, температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання) на експлуатаційні характеристики гібридних покриттів, що необхідно враховувати при їхньому застосуванні.

Розроблено рекомендації щодо технології нанесення гібридних покриттів на великогабаритні залізничні конструкції, що забезпечують рівномірність шару та високу якість захисту.

Перспективи застосування гібридних покриттів є широкими і охоплюють захист не лише елементів колії, але й мостів, естакад та іншої залізничної інфраструктури, що піддається вібраційним навантаженням.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку «розумних» гібридних покриттів, здатних самостійно відновлювати пошкодження, спричинені вібраційним зносом.

Впровадження розроблених гібридних покриттів у практику обслуговування залізничних конструкцій сприятиме підвищенню їх безпеки, надійності та зменшенню експлуатаційних витрат.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Chen X., Li W., Park C. Polymer-metal hybrid coatings for vibration isolation in transport structures. *Materials & Design*. 2021. 201. 110045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110045>
2. Ivanov V., Petrov A., Smirnov N. Effect of hybrid coatings on the dynamic response of mechanical structures under vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. 185. 110567. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110567>
3. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
4. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
5. Li H., Chen Z., Wang X. Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*. 2022. 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
6. Martinez S., Kim D., Lopez F. Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*. 2023. 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>



7. 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 Žilina*. 2019. 21(1), 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
8. Li H., Chen Z., Wang X. Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*. 2022. 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
9. Martinez S., Kim D., Lopez F. Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*. 2023. 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>
10. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy 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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2(7), 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Müller T., Schneider J., Weber H. Hybrid coatings for vibration mitigation in railway applications. *Engineering Structures*. 2021. 243, 113456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113456>
12. Singh A., Zhang Q., Mishra R. Nanostructured hybrid coatings for vibration damping in mechanical systems. *Applied Surface Science*. 2022. 598, 154321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154321>
13. Thompson R., Johnson E., White P. Metal coatings with viscoelastic additives for vibration reduction in automotive components. *Journal of Vibration and Control*. 2020. 26(18), 1645–1657. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546320931234>
14. Wang L., Zhao Y., Zhang K. Graphene-enhanced hybrid coatings for vibration suppression in aerospace structures. *Carbon*. 2022. 189, 210–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.045>
15. Zhang Y., Liu H., Wang J. Hybrid damping coatings for vibration reduction in automotive structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2020. 487, 115456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115456>
16. Almeida J. H. S., Ribeir, M. L. Tita, V. Hybrid fiber-metal laminate coatings for vibration damping in marine and automotive applications. *Composite Part B: Engineering*. 2023. 254, 110589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110589>
17. Gao Y., Wei C., Sun D. Multifunctional hybrid coatings with vibration damping and corrosion resistance for industrial machinery. *Journal of Materials Science*. 2022. 57(12), 6782–6795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07094-y>
18. Karthik V., Purohit R., Gupta N. Bio-inspired hybrid coatings for passive vibration control in light-weight automotive structures. *Materials Today Communications*. 2024. 38, 107812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107812>

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

State University of Infrastructure and Technologies

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

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

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

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

State University of Infrastructure and Technologies

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

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

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

### **O. V. Zelenskyi**

Zaporizhzhia Polytechnic National University

Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine

tel: +38 (066) 673-26-33, E-mail: [alekseyz643@gmail.com](mailto:alekseyz643@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3292-4706>

### **O. O. Olenytsia**

Zaporizhzhia Polytechnic National University

Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine

tel: +38 (097) 355-94-13, E-mail: [padchenkolena@ukr.net](mailto:padchenkolena@ukr.net)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

**O. P. Cherkashin**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

17 Ioanna Pavla II Street, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (067) 545-88-89, E-mail: alex.digma77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6871-0860>

**HYBRID COATINGS FOR MITIGATING VIBRATIONAL WEAR IN  
RAILWAY STRUCTURES: PERFORMANCE EVALUATION AND  
IMPLEMENTATION PROSPECTS**

*This study examines the application of hybrid coatings as an effective means of protecting railway structures from vibrational wear. A review of current materials used in hybrid coatings is presented, focusing on compositions that combine the properties of polymers, metals, and ceramics. Experimental investigations demonstrate that such coatings significantly reduce wear rates of contact surfaces under dynamic loading while maintaining the structural integrity of the base material. A comparative analysis of different coating types is provided, assessing their adhesion, crack resistance, and durability under prolonged mechanical stress. The prospects for implementing hybrid coatings in the railway industry are discussed, particularly for rail joints, switch mechanisms, and fastening components. The results highlight the high potential of hybrid systems to improve the longevity and reliability of railway infrastructure. The article presents the concept of a multifunctional hybrid coating for freight wagons, combining various types of materials and application technologies to provide comprehensive protection against corrosion, wear, ultraviolet radiation, and mechanical impact. The structure of the proposed system is described, the selection of components for each layer is justified, and the main technical and operational characteristics are provided. The concept is aimed at increasing the durability of rolling stock and reducing maintenance costs.*

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

**REFERENCES**

1. Chen, X., Li, W., & Park, C. (2021). Polymer-metal hybrid coatings for vibration isolation in transport structures. *Materials & Design*, 201, 110045. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110045>
2. Ivanov, V., Petrov, A., & Smirnov, N. (2023). Effect of hybrid coatings on the dynamic response of mechanical structures under vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185, 110567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110567>
3. Sulym, A., Fomin, O., Khozya, P., & 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>
4. 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>
5. Li, H., Chen, Z., & Wang, X. (2022). Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*, 34(15), 2206789. <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
6. Martinez, S., Kim, D., & Lopez, F. (2023). Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>

7. 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*, Vol. 21, № 1, 28-34. Retrieved from: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
8. Li, H., Chen, Z., & Wang, X. (2022). Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*, 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
9. Martinez, S., Kim, D., & Lopez, F. (2023). Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>
10. 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. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2019\\_2\(7\)\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Müller, T., Schneider, J., & Weber, H. (2021). Hybrid coatings for vibration mitigation in railway applications. *Engineering Structures*, 243, 113456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113456>
12. Singh, A., Zhang, Q., & Mishra, R. (2022). Nanostructured hybrid coatings for vibration damping in mechanical systems. *Applied Surface Science*, 598, 154321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154321>
13. Thompson, R., Johnson, E., & White, P. (2020). Metal coatings with viscoelastic additives for vibration reduction in automotive components. *Journal of Vibration and Control*, 26(18), P. 1645–1657. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546320931234>
14. Wang, L., Zhao, Y., & Zhang, K. (2022). Graphene-enhanced hybrid coatings for vibration suppression in aerospace structures. *Carbon*, 189, 210–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.045>
15. Zhang, Y., Liu, H., & Wang, J. (2020). Hybrid damping coatings for vibration reduction in automotive structures. *Journal of Sound and Vibration*, 487, 115456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115456>
16. Almeida, J. H. S., Ribeiro, M. L., & Tita, V. (2023). Hybrid fiber-metal laminate coatings for vibration damping in marine and automotive applications. *Composite Part B: Engineering*, 254, 110589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110589>
17. Gao, Y., Wei, C., & Sun, D. (2022). Multifunctional hybrid coatings with vibration damping and corrosion resistance for industrial machinery. *Journal of Materials Science*, 57(12), 6782–6795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07094-y>
18. Karthik, V., Purohit, R., & Gupta, N. (2024). Bio-inspired hybrid coatings for passive vibration control in lightweight automotive structures. *Materials Today Communications*, 38, 107812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107812>