

ФОМІН О. В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет

КОЗИНКА О. С., аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту



Класифікаційний підхід щодо вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів

Анотація. У статті розглянуто класифікаційний підхід щодо вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів. Запропоновано систему класифікації, яка враховує основні чинники експлуатаційного середовища, типи вібраційних навантажень, фізико-механічні властивості матеріалів покриттів і особливості конструктивних елементів вагонів. Такий підхід дає змогу оптимізувати процес підбору покриттів для підвищення довговічності та надійності залізничного рухомого складу. Результати дослідження можуть бути використані для проектування, модернізації та технічного обслуговування вантажних вагонів з урахуванням сучасних вимог щодо віброзахисту.

Ключові слова: залізничний транспорт, транспортні технології, вагони, ремонт, експлуатація, надійність, несучі системи, покриття захисні, автоматизація, комп'ютерне моделювання.

Вступ.

Сучасний залізничний транспорт відіграє головну роль у логістиці та економіці, а вантажні вагони є його основою, забезпечуючи перевезення значних обсягів продукції. Їхня надійність і довговічність є критично важливими для ефективності перевезень. Однак елементи вантажних вагонів постійно зазнають значних вібраційних навантажень, що спричиняють втому матеріалу, корозію, передчасний знос, і, як наслідок, часті ремонти і заміни, а це у свою чергу викликає значні фінансові витрати і операційні затримки. Зниження вібраційних впливів може суттєво подовжити термін служби компонентів.

Неконтрольовані вібрації також впливають на безпеку руху та можуть призвести до пошкодження транспортованого вантажу. Крім того, вібрації негативно впливають на комфорт і здоров'я навченого персоналу. Тому питання антивібраційного захисту є надзвичайно актуальним. Сучасні методи захисту часто не є оптимальними або мають обмежений термін ефективності. Вибір правильного антивібраційного покриття є складним завданням, що пов'язано з різноманітністю матеріалів вагонів, умов експлуатації та типів вібраційних навантажень. Відсутність систематизованого підходу для вибору покриттів призводить до неефективних рішень, оскільки часто застосовують універсальні покриття, які не забезпечують належного рівня захисту, або ж вибір відбувається емпіричним шляхом, що не гарантує оптимального результату.

Це підкреслює потребу в науково обґрунтованому підході.

Саме тут і полягає актуальність запропонованого науково-прикладного дослідження. Розроблення класифікаційного підходу дасть змогу систематизувати знання та врахувати всі чинники, що впливають на вибір покриття. Такий підхід допоможе ідентифікувати найбільш ефективні рішення для конкретних умов і оптимізувати процес вибору та застосування антивібраційних покриттів. Класифікація може бути базована на типах матеріалів, інтенсивності вібрацій, температурних режимах і агресивності середовища, а також урахувати вартість покриттів і легкість їх нанесення. Такий підхід допоможе розробити чіткі рекомендації для інженерів, щоб уникнути помилок із вибором і застосуванням захисних матеріалів.

Проведення цього дослідження дасть змогу істотно підвищити надійність елементів вантажних вагонів, що призведе до зменшення експлуатаційних витрат за рахунок подовження міжремонтних інтервалів. Буде збільшено термін служби вагонного парку в цілому, покращена безпека перевезень і зменшено пошкодження вантажів. Екологічний аспект також важливий, оскільки подовження терміну служби обладнання зменшує потребу у виробництві нового. Це дослідження дасть практичні інструменти для залізничної галузі, а його результати можуть бути інтегровані в нормативні документи і методичні рекомендації, що забезпечить уніфікований підхід для антивібраційного захисту і відкриє шлях для інноваційних розробок у сфері матеріалознавства.

механіки. Воно може стати основою для подальших наукових робіт, його результати будуть корисними для промислових підприємств, що виробляють та експлуатують залізничний рухомий склад, а також навчальних закладів, де готують фахівців для залізничної галузі. Упровадження класифікаційного підходу забезпечить більш раціональне використання ресурсів, дасть змогу створити більш ефективні та довговічні вантажні вагони і, як наслідок, підвищить конкурентоспроможність української залізничної системи на міжнародному ринку. Дослідження також може стимулювати розвиток вітчизняного виробництва антивібраційних покриттів, що забезпечить технологічну незалежність та економічне зростання. Отже, актуальність цього дослідження є беззаперечною для сучасної транспортної інфраструктури, а його результати матимуть широкий спектр застосувань і значний економічний ефект.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження [1] присвячене аналізу вібраційно-демпфуючих властивостей полімерних композитів для вантажних вагонів. Автори використовували експериментальні методи і моделювання для оцінювання ефективності різних матеріалів. Результати показали, що композити на основі поліуретану мають найкращі характеристики зменшення вібрацій порівняно з традиційними матеріалами.

У статті [2] подано огляд сучасних антивібраційних покриттів для залізничного транспорту. Автори класифікують матеріали за типом, властивостями та сферами застосування. Особливу увагу приділено полімерним і гібридним покриттям, які демонструють високу стійкість до динамічних навантажень.

Дослідження [3] зосереджене на оцінюванні в'язкоеластичних матеріалів для зменшення вібрації в елементах вантажних вагонів. Автори провели серію тестів на зносостійкість і демпфування, виявивши оптимальні матеріали для різних умов експлуатації.

У статті [4] запропоновано метод класифікації вібродемпфуючих матеріалів на основі їхніх механічних властивостей. Автори використовували алгоритми машинного навчання для прогнозування ефективності матеріалів у реальних умовах експлуатації залізничного транспорту.

Дослідження [5] присвячене проектуванню та оптимізації багатошарових покриттів для віброізоляції вантажних вагонів. Автори використовували метод скінченних елементів для аналізу напружень і деформацій, що дало змогу підвищити ефективність покриттів.

У статті [6] розглянуто новітні тенденції в розробленні антивібраційних покриттів для залізничної галузі. Автори аналізують сучасні матеріали, такі як нанокомпозити, і їхні переваги порівняно з традиційними рішеннями.

Дослідження [7] порівнює демпфуючі властивості гумових і поліуретанових матеріалів для

вантажних вагонів. Експериментальні дані показали, що поліуретанові покриття мають кращу довговічність в агресивних умовах експлуатації.

У статті [8] проаналізовано вібродемпфування в елементах вантажних вагонів за допомогою композитних покриттів. Автори використовували метод скінченних елементів для моделювання динамічної поведінки матеріалів.

Дослідження [9] аналізує динамічну поведінку вантажних вагонів із різними типами антивібраційних покриттів. Автори виявили, що матеріали з високим коефіцієнтом демпфування значно знижують амплітуду коливань.

У статті [10] наведено експериментальне оцінювання в'язкоеластичних матеріалів для залізничних застосувань. Результати показали, що матеріали на основі акрилових смол мають високу ефективність у широкому діапазоні частот.

Дослідження [11] пропонує системний підхід для вибору матеріалів для вібродемпфування в залізничних компонентах. Автори розробили критерії оцінювання, що враховують механічні властивості та умови експлуатації.

У статті [12] описано розроблення високоефективних демпфуючих покриттів для важкого транспорту. Автори використовували нові полімерні композиції, що забезпечують стабільність за тривалих навантажень.

Дослідження [13] використовує машинне навчання для класифікації антивібраційних матеріалів у залізничній галузі. Алгоритми дали змогу прогнозувати ефективність матеріалів на основі їхніх фізико-хімічних властивостей.

У статті [14] проаналізовано динамічну поведінку вантажних вагонів із різними демпфуючими покриттями за ударних навантажень. Результати показали, що гібридні матеріали є найбільш ефективними.

Дослідження [15] поєднує експериментальні та чисельні методи для аналізу вібродемпфування у вантажних вагонах. Автори виявили, що багатошарові покриття зменшують вібрацію на 30-40 %.

Дослідження [16] присвячено теоретичному та практичному визначенню параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори аналізують ефективність використання таких систем для рекуперації енергії, зокрема в разі гальмування. Результати показують можливість зменшення енергоспоживання та підвищення економічної ефективності експлуатації.

У статті [17] розглянуто методи визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу підземного транспорту. Автори пропонують математичну модель для оптимізації ємності та швидкості заряджання, що дає змогу підвищити ефективність системи рекуперативного гальмування.

У статті [18] подано огляд сучасних технологій демпфування для вантажних вагонів.

Автори виділили головні чинники, що впливають на ефективність матеріалів, такі як температура і частота коливаль.

Дослідження [19] присвячене оптимізації композитних покриттів для зменшення вібрації в залізничному транспорті. Автори використовували методологію Taguchi для підвищення ефективності матеріалів.

У статті [20] оцінено демпфуючі властивості еластомерних покриттів для вантажних вагонів. Результати показали, що матеріали на основі нітрильного каучуку мають високу зносостійкість.

Дослідження [21] зосереджене на визначенні динамічних навантажень на напіввагон за його фіксації в'язким з'єднанням на палубі порома. Автори використовують математичне моделювання для оцінювання впливу хитамиці на міцність кріплення. Результати показують, що в'язке демпфування зменшує динамічні навантаження на конструкцію.

У статті [22] проаналізовано довговічність несучої конструкції відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному поромі. Автори використовують методи скінченних елементів для оцінювання напружень і деформацій, що виникають під час морського переходу. Результати підтверджують надійність конструкції за умови правильного розподілу навантажень.

У дослідженні [23] проаналізовано останні досягнення в галузі полімерних демпфуючих матеріалів для залізниць. Автори виділили перспективні напрями, такі як використання нанонаповнювачів.

У статті [24] запропоновано методику ухвалення рішень для вибору антивібраційних покриттів у вантажному транспорті. Автори розробили систему оцінювання на основі багатокритеріального аналізу.

Виходячи з аналізу літератури, можна стверджувати, що питанню класифікаційного підходу для вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів не приділено достатньої уваги. Сучасні дослідження здебільшого зосереджені на загальних аспектах віброзахисту або конкретних матеріалах, не систематизуючи їх вибір. Це створює труднощі для інженерів щодо підбору оптимальних покриттів, оскільки відсутній чіткий механізм класифікації та рекомендацій. Такий недолік може призвести до неефективного використання ресурсів і зниження експлуатаційної надійності вантажних вагонів. Розроблення чіткого класифікаційного підходу є критично важливим для підвищення ефективності віброзахисту і оптимізації процесів. Без належної уваги до цього питання впровадження новітніх технологій і матеріалів буде ускладнене.

Визначення мети та завдання дослідження.

Адаптивне застосування антивібраційних покриттів на основі їх класифікації для вантажних вагонів спрямоване на розроблення науково

обґрунтованих підходів для вибору та використання цих матеріалів. Метою дослідження є підвищення ефективності віброзахисту вантажних вагонів за рахунок оптимального підбору покриттів, що враховують специфічні умови експлуатації та характеристики вібрації. Кінцевим результатом стане зниження динамічних навантажень, підвищення надійності та довговічності елементів конструкції, а також покращення умов перевезення вантажів.

Для досягнення мети були вирішені такі завдання:

- класифікація існуючих антивібраційних покриттів за їхніми властивостями, ефективністю і умовами застосування;
- аналіз джерел вібрації та їхнього впливу на різні типи вантажних вагонів і вантажів;
- розроблення критеріїв вибору оптимального покриття для конкретних умов експлуатації, ураховуючи матеріал вагона, тип вантажу та інтенсивність вібрації;
- вплив еластомерних покриттів на динамічні характеристики візка вантажного вагона (зменшення вібрації і власних коливань);
- створення алгоритму адаптивного вибору та застосування покриття, який би давав змогу динамічно змінювати його тип або товщину залежно від поточних умов;
- розроблення рекомендацій з упровадження цієї системи в промисловість для підвищення довговічності вагонів і збереження вантажів.

Основна частина дослідження.

Сучасна експлуатація вантажних вагонів нерозривно пов'язана з постійним впливом динамічних навантажень, що генерують значні вібраційні коливання. Ці вібрації призводять до прискореного зносу елементів конструкції, руйнування зварних з'єднань, деформації металу, а також негативно впливають на термін служби вантажів і комфорт навченого персоналу. Сучасні методи віброзахисту, хоча й використовувалися, часто є недостатньо ефективними або економічно не виправданими, оскільки не враховують повної специфіки розподілу вібраційних навантажень на різних елементах вагона. Вибір антивібраційних захисних покриттів сьогодні здебільшого базований на емпіричних даних або загальних рекомендаціях, що не гарантує оптимального рішення для конкретних умов експлуатації.

Відсутність систематизованого підходу щодо класифікації вібраційних навантажень і відповідного підбору захисних матеріалів за їхніми характеристиками призводить до неефективного використання ресурсів і неповного розв'язання проблеми вібрації. Це створює нагальну потребу розробити класифікаційний підхід, який дасть змогу цілеспрямовано вибирати антивібраційні покриття з урахуванням індивідуальних особливостей елементів вантажних вагонів. Такий підхід має бути базований на глибокому аналізі джерел і характеристик вібрації,

а також властивостях різних типів захисних матеріалів.

Розроблення чітких критеріїв класифікації та ефективної методології вибору є основним етапом підвищення надійності та довговічності вантажного рухомого складу, що в кінцевому підсумку вплине на безпеку залізничних перевезень і призведе до зниження експлуатаційних витрат.

У конструкціях вантажних вагонів антивібраційні захисні покриття відіграють важливу роль у зниженні динамічних навантажень, підвищенні ресурсу елементів і забезпеченні комфорту і безпеки перевезень. Для досягнення необхідного рівня віброзахисту застосовують три основні групи інженерних матеріалів: металічні, полімерні та композитні.

Металічні матеріали. Металічні матеріали, зокрема сталь, алюміній і їхні сплави, використовують як несучі елементи у складі антивібраційних систем або як зовнішнє покриття з підвищеною зносостійкістю. У вигляді тонких прошарків чи вставок вони можуть виконувати функцію жорсткого обмежувача або демпфуючої оболонки. Найчастіше метали застосовують у комбінованих конструкціях разом із полімерними або еластомерними шарами. Переваги: висока механічна міцність, термостійкість, зносостійкість, добрі адгезійні властивості. Недоліки: низькі власні демпфуючі характеристики, велика маса.

Полімерні матеріали. Полімери, зокрема еластомери, поліуретани, гуми, ПВХ, активно використовують в елементах, які безпосередньо працюють на поглинання вібрацій. Найпоширеніші рішення включають гумові або поліуретанові подушки, прокладки, мастики, облицювальні шари, що наносять на деталі кузова та візка. Полімерні матеріали мають високий коефіцієнт внутрішнього тертя, що забезпечує ефективне поглинання енергії вібрацій. Переваги: відмінна вібродемпфуюча здатність, стійкість до атмосферного впливу, гнучкість, хімічна стійкість. Недоліки: обмежена механічна міцність, залежність властивостей від температури.

Композитні матеріали. Композитні матеріали на основі полімерної матриці з армуванням (скловолокно, вуглеволокно, арамідні волокна) застосовують для створення антивібраційних елементів із високою жорсткістю і малою масою. Вони ефективно поєднують демпфуючі властивості полімерів із міцністю армуючих компонентів. Їх часто використовують у вигляді сандвіч-панелей, панелей підлоги, перегородок або захисних накладок. Переваги: високе співвідношення міцності і маси, стійкість до втоми, корозійна стійкість, налаштовувані механічні характеристики. Недоліки: висока вартість, складність ремонту, чутливість до локальних пошкоджень. Для досягнення необхідного рівня віброзахисту застосовують три основні групи інженерних матеріалів: металічні, полімерні та композитні. На рис. 1 подано ієрархічну структуру інженерних матеріалів.

Залежно від призначення конструктивного елемента та умов експлуатації доцільним є використання як окремих матеріалів, так і комбінованих антивібраційних систем. Найбільш ефективними вважають багатошарові структури, що поєднують жорсткість металів, еластичність полімерів і високу питому міцність композитів. Такий комплексний підхід забезпечує надійний віброзахист елементів вантажних вагонів і подовжує термін їхньої експлуатації.

Оптимальний вибір матеріалу залежить від функціонального призначення елемента:

- для високого поглинання вібрацій – полімерні матеріали та еластомери;
- структурної підтримки з помірним демпфуванням – композити;
- зносостійких елементів з обмеженою амортизацією – металеві або комбіновані системи.

Комбінування цих матеріалів у вигляді багатошарових покриттів (наприклад метал + гума + полімер) забезпечує максимальний ефект віброзахисту у вантажних вагонах.



Рис. 1. Ієрархічна структура інженерних матеріалів

Еластомерні полімерні матеріали відіграють головну роль у забезпеченні антивібраційного захисту елементів вантажних вагонів, поглинаючи кінетичну енергію та зменшуючи передавання вібрацій. Їх класифікують за кількома критеріями, що відображають їхню хімічну будову, фізико-механічні властивості та сферу застосування.

1. Хімічна природа полімеру.

Натуральні каучуки (NR):

- висока еластичність, хороші динамічні властивості, морозостійкість;
- обмежена стійкість до олій та озону;
- використовувані в пружинах, амортизаторах, ущільненнях.

Синтетичні каучуки:

- бутадієн-стирольні каучуки (SBR): поширені, мають хороші механічні властивості, стійкість до стирання;
- бутадієнові каучуки (BR): висока еластичність за низьких температур, хороша зносостійкість;
- ізопренові каучуки (IR): властивості, близькі до натурального каучуку;

– нітрильні каучуки (NBR): відмінна маслостійкість, але нижча морозостійкість. Застосовують там, де потрібна стійкість до агресивних середовищ;

– хлоропренові каучуки (CR / Неопрен): хороша стійкість до погодних умов, озону, олій і вогню. Часто використовують для зовнішніх елементів;

– етилен-пропілен-дієнові каучуки (EPDM): висока стійкість до озону, атмосферних впливів, тепла та води. Широко застосовують у ущільненнях;

– силіконові каучуки (VMQ / MVQ): широкий діапазон робочих температур, висока термостійкість, хімічна інертність. Застосовують у спеціалізованих антивібраційних елементах;

– поліуретанові еластомери (PU): висока міцність на розрив, стійкість до стирання, висока твердість і несуча здатність. Використовують для виконавантажених елементів.

2. Фізико-механічні властивості.

– твердість: визначає жорсткість матеріалу (за Шором А або D), впливає на несучу здатність і демпфуючі характеристики;

– модуль пружності (Юнга): характеризує опір матеріалу деформації;

– коефіцієнт демпфування (втрат): показує здатність матеріалу розсіювати енергію вібрації. Чим вищий коефіцієнт, тим ефективніше демпфування;

– межа міцності та відносне подовження: характеризують здатність матеріалу витримувати навантаження без руйнування та деформацію до розриву;

– стійкість до агресивних середовищ: олії, паливо, вода, озон, ультрафіолетове випромінювання;

– температурний діапазон експлуатації: мінімальна та максимальна температура, за якої матеріал зберігає свої властивості;

– зносостійкість: важлива для елементів, що зазнають тертя.

3. Призначення та застосування у вантажних вагонах:

– елементи буксових вузлів: гумові прокладки, втулки, пружини, що демпфують вібрації від колісних пар;

– демпфуючі елементи візків: гумові амортизатори, пружні вставки, що знижують динамічні навантаження на раму вагона;

– пружні опори кузова: еластомерні подушки, що забезпечують ізоляцію кузова від вібрацій візка;

– ущільнення та прокладки: для герметизації з'єднань, що також можуть виконувати функцію демпфування дрібних вібрацій;

– елементи гальмівних систем: втулки та ущільнення, які також можуть впливати на вібраційні характеристики.

Ця класифікація допомагає інженерам вибирати найбільш прийнятний еластомер для конкретних умов експлуатації та вимог до антивібраційного захисту вантажних вагонів, забезпечуючи їхню надійність і довговічність.

Аналіз джерел вібрацій та їхнього впливу на різні типи вантажних вагонів і вантажів

У процесі експлуатації вантажного залізничного транспорту виникають різного роду вібрації, які суттєво впливають як на сам рухомий склад, так і вантаж. Вібраційні навантаження виникають під дією нерівностей колії, динаміки руху, а також технічного стану окремих елементів вагона. Для забезпечення довговічності конструкцій і збереження вантажу необхідно ідентифікувати джерела вібрацій, оцінити їхню дію та передбачити ефективні захисні заходи.

Основні джерела вібрацій у вантажних вагонах:

– нерівності залізничної колії (стики рейок, зношення шпал, колійні переходи), які спричиняють вертикальні та ударні коливання;

– неспіввісність коліс або осей, що провокує періодичні механічні збурення, які особливо проявляються на високих швидкостях;

– взаємодія пари «колесо – рейка», яка створює резонансні коливання у вертикальній і горизонтальній площинах;

– різкі зміни швидкості руху під час рушання, гальмування та маневрування, які формують імпульсні навантаження на конструктивні вузли;

– аеродинамічні впливи, що виникають із рухом на високій швидкості або в тунельних умовах;

– зношення ресорного підвісу, візків і амортизаторів, що знижує вібропоглинальні властивості конструкції.

Джерела вібрацій слід враховувати на етапі проектування вагонів. Зношення елементів візка призводить до резонансних частот. Найбільш ефективними для демпфування виявилися поліуретанові та армовані еластомерні покриття.

Кожен тип вантажного вагона має свої вразливі елементи. Вплив вібрацій на типи вантажних вагонів:

– напіввагони зазнають сильних вібрацій у хребтовій балці, дні кузова та місцях стику кузовних панелей. Особливо інтенсивні коливання виникають із перевезенням сипких вантажів, які нерівномірно розподілені по площині;

– платформи відчують динамічні імпульси в зонах кріплення контейнерів або техніки, зокрема на фітінгових вузлах;

– цистерни схильні до резонансних вібрацій через коливання рідинної маси всередині. Такий ефект створює періодичне навантаження на обичайку та опори цистерни;

– криті вагони мають розвинені вертикальні стінки, які передають високочастотні вібрації, що можуть спричинити мікропошкодження та розгерметизацію;

– хопери зазнають локальних ударів і вібрацій у нижній частині кузова, особливо під час розвантаження.

Особливо небезпечні для вантажу та вагонів низькочастотні (1–10 Гц) і середньочастотні (10–100 Гц) вібрації, які викликають матеріальну втомлюваність. Адаптація антивібраційного захисту до конкретних зон (наприклад хребтової балки або верхньої обв'язки напіввагона) значно підвищує ресурс вагона.

Термопластичні еластомери – це клас полімерних матеріалів, які поєднують властивості еластомерів (гнучкість, пружність, еластичність) із можливістю термопластичної обробки (лиття під тиском, екструзія, пресування). ТРЕ-покриття застосовують у залізничній галузі завдяки високій стійкості до вібрацій, погодних умов і старіння.

Термопластичні еластомери є перспективним матеріалом для антивібраційного захисту конструктивних елементів вантажних вагонів. Їхня висока функціональність, універсальність у застосуванні та легкість у виготовленні робить ТРЕ доцільним вибором для умов інтенсивної експлуатації, особливо таких зон, як хребтові балки, кузова, пружні опори та вставки.

Вибір антивібраційного покриття для конструктивних елементів вантажних вагонів є

багатофакторним завданням, що потребує врахування умов експлуатації, типу вантажу, матеріалу основи, а також функціонального призначення захисного шару. Ефективність покриття визначена не лише його демпфуючими властивостями, але й стійкістю до механічних, хімічних і кліматичних навантажень.

Розглянемо критерії вибору антивібраційного покриття для вантажних вагонів.

1. Тип елемента конструкції. Хребтова та шворнева балки: найбільш навантажені зони, потребують міцного, зносостійкого покриття з високими антивібраційними властивостями. Кузов і днище: орієнтовані на шумопоглинання та захист від локальних вібрацій. Бокові стінки: менш навантажені, але підлягають ударному впливу вантажу.

2. Матеріал основи. Для сталених елементів – бажано покриття з хорошою адгезією до металу, стійке до корозії. Для алюмінієвих або композитних основ – важливо уникати розтріскування, забезпечити гнучкість і термічну стабільність покриття.

3. Тип вантажу. Сипкі вантажі (руда, щебінь): необхідні покриття з високою абразивною стійкістю. Хімічно активні вантажі: потрібна хімічна інертність (наприклад поліуретани, фторопласти). Вантажі, що бояться вібрацій (техніка, продукція): критично важливі ефективні вібродемпфуючі властивості.

4. Інтенсивність вібраційного навантаження. За високочастотних вібрацій рекомендовано застосовувати еластомери з високим внутрішнім тертям (наприклад EPDM, силіконові гуми). За

ударних навантажень – армовані гібридні покриття з комбінованими властивостями.

5. Кліматичні умови експлуатації. Для регіонів із низькими температурами – покриття, що не втрачають еластичність за морозних умов (TPU, силікони). У спекотному або вологому кліматі – гідрофобно-стійкі композиції.

6. Метод нанесення та ремонтпридатність. Перевагу мають покриття, які можна наносити без демонтажу елементів. Важливим чинником є можливість локального ремонту або заміни шару без повного видалення попереднього покриття.

7. Термін служби та економічна доцільність. Вибір залежить від вартості життєвого циклу покриття, де враховано витрати на матеріал, нанесення, обслуговування та утилізацію. В окремих випадках ефективнішими є дорожчі, але довговічні багатшарові системи, які зменшують частоту техобслуговування.

Оптимальний вибір антивібраційного покриття здійснюють на основі системного аналізу конструктивних особливостей вагона, характеру навантажень та умов експлуатації. Для найбільш ефективного результату рекомендовано застосовувати комплексні гібридні рішення, що поєднують вібродемпфуючі, антикорозійні та шумоізоляційні властивості. На рис. 2 зображено блок-схему класифікації антивібраційних покриттів.



Рис. 2. Класифікація антивібраційних покриттів

Еластомерні покриття, що застосовують для віброгасіння у візках вантажних вагонів, суттєво покращують їхні динамічні характеристики. Розглянемо фізичні властивості еластомерів: висока демпфуюча здатність (поглинають енергію коливань), стійкість до стирання (покриття кузова напіввагона), зносостійкість, робота в широкому температурному діапазоні.

Вплив на динамічні характеристики візка вантажного вагона:

1. Зменшення вібрацій і коливань. Під час руху вагона по нерівностях колії еластомерне покриття поглинає удари й коливання, зменшуючи передавання їх на раму вагона і вантаж. Це веде до зниження динамічного навантаження на конструктивні елементи. На рис. 3 зображений фрагмент кузова з візком напіввагона, який покритий рідкою гумою на основі бітумно-поліуретанового покриття.

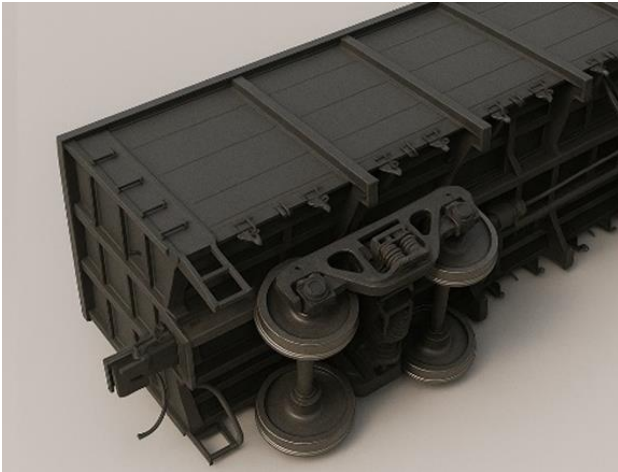


Рис. 3. Фрагмент кузова з візком напіввагона, який покритий рідкою гумою на основі бітумно-поліуретанового покриття

2. Підвищення плавності ходу. Завдяки гасінню високочастотних коливань покращено комфорт руху, навіть у важких умовах експлуатації (погана колія, великі швидкості).

3. Зменшення зносу. Демпфування ударів продовжує ресурс елементів візка (підшипників, ресор, колісних пар, рами). Зменшення динамічного навантаження також знижує зношування рейок і коліс.

4. Покращення стійкості до розгойдування та розбігу. Еластомери ефективно пригнічують горизонтальні і вертикальні коливання, зменшуючи ймовірність гребеневого удару та «змієподібного» руху.

5. Зниження рівня шуму. Амортизаційні властивості сприяють зменшенню акустичних коливань, що важливо для руху в населених пунктах.

Еластомерні елементи можна застосовувати у візках: буксових вузлах (демпфуючі прокладки), підвісках (еластомерні елементи замість або разом із металевими пружинами), з'єднаннях між візком і кузовом, гальмівній системі (віброгасні втулки та ущільнення).

Приклади застосування еластомерних елементів: візки типу 18-100 – модернізовані з елементами еластомерного демпфування; візки нових поколінь (наприклад Barber S-2-R) – використовують еластомерні елементи в бічних опорах; європейські вантажні вагони (Y25, Minden-Deutz) – оснащені гумо-металевими амортизаторами (рис. 4).

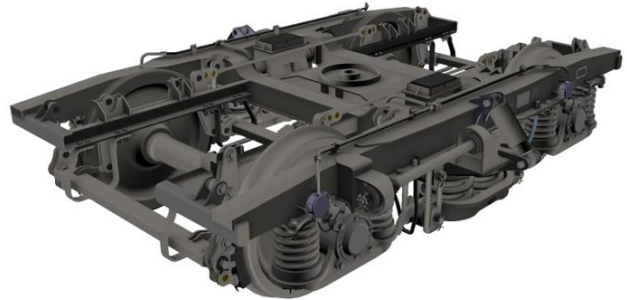


Рис. 4. Європейський вантажний візок (Y25, Minden-Deutz) оснащений гумо-металевими амортизаторами

За допомогою методу автоматизованого розрахунку реалізовано метод кінцевих елементів (МКЕ) у програмі SolidWorks Simulation. Проведемо модальний аналіз фрагменту верхньої обв'язки напіввагона (без покриття), товщина металу 7 мм і з еластомерним покриттям товщиною 10 мм (рис. 5).

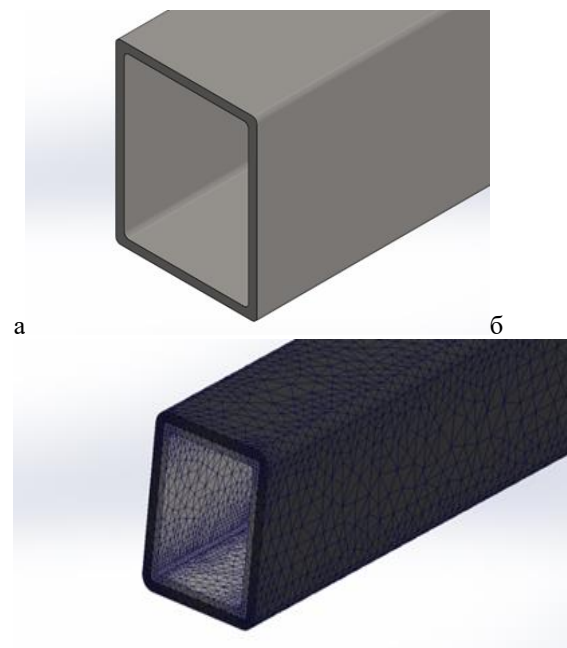


Рис. 5. Фрагмент верхньої обв'язки напіввагона:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Власні частоти (резонансні частоти) конструкції – це частоти, на яких конструкція сама буде коливатися після відхилення від положення рівноваги. З частотного аналізу ми можемо визначити власні частоти конструкції, а також форми її вібраційної реакції або моди.

Резонанс – це явище стрімкого зростання амплітуди змущених коливань системи, яке настає під час наближення частоти зовнішньої дії до певних значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи.

Проведемо частотний аналіз (із кріпленням). Без покриття і з еластомерним покриттям, покриваючи металеву деталь 7 мм покриттям товщиною 10 мм. Фіксуємо деталь із двох боків, з одного боку (лівого) вибираємо фіксовану геометрію (Fixed Geometry), а з іншого (правого) боку беремо нежорстке закріплення (Roller/Slider).

Розбиття моделі на кінцево-елементну сітку (Meshing). Максимальний розмір елемента – 49,6101 мм, мінімальний розмір елемента – 3,06147 мм, усіх вузлів – 533966, усіх елементів – 325233. На рис. 6 зображено список резонансних частот і коефіцієнти масової участі п'яти форм коливань.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	554,55	88,259	0,01133
2	661,94	105,35	0,0094921
3	2 685,9	427,47	0,0023394
4	2 848,5	453,36	0,0022057
5	3 207,4	510,48	0,0019589

Mode No.	Freq (Hert: X direction)	Y direction	Z direction
1	88,259	0,69788	5,51E-12
2	105,35	4,81E-12	0,69751
3	427,47	0,13978	9,62E-11
4	453,36	2,05E-09	3,21E-09
5	510,48	7,53E-11	0,14003

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	505,11	80,391	0,012439
2	602,84	95,945	0,010423
3	2435,8	387,68	0,0025795
4	2510,8	399,6	0,0025025
5	2896,2	460,94	0,0021695

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	80,391	0,69786	1,58E-10	4,87E-13
2	95,945	1,41E-10	0,69748	2,14E-13
3	387,68	0,13958	7,32E-10	4,61E-11
4	399,6	8,80E-08	3,94E-10	8,06E-13
5	460,94	1,05E-09	0,13942	3,61E-10

Рис. 6. Список резонансних частот і коефіцієнти масової участі:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Коефіцієнти масової участі важливі для визначення відповідності обчислених форм коливань із розв'язанням динамічних задач із рухом основи. Цей коефіцієнт визначає відсоток маси системи, задіяної в конкретній формі, і надає міру енергії, зосередженої в кожній резонансній формі. Режим із великим коефіцієнтом масової участі зазвичай суттєво впливає на динамічні реакції системи. Для багатьох

програм потрібно, щоб щонайменше 80 % маси системи брало участь у заданих напрямках – X, Y, Z.

Щоб верхня обв'язка не деформувалася під впливом коливань, не входила в резонанс, робоча частота має відрізнятися. На графіку відгуку бачимо (рис. 7), що значення частоти зростає зі збільшенням номера форми коливань.

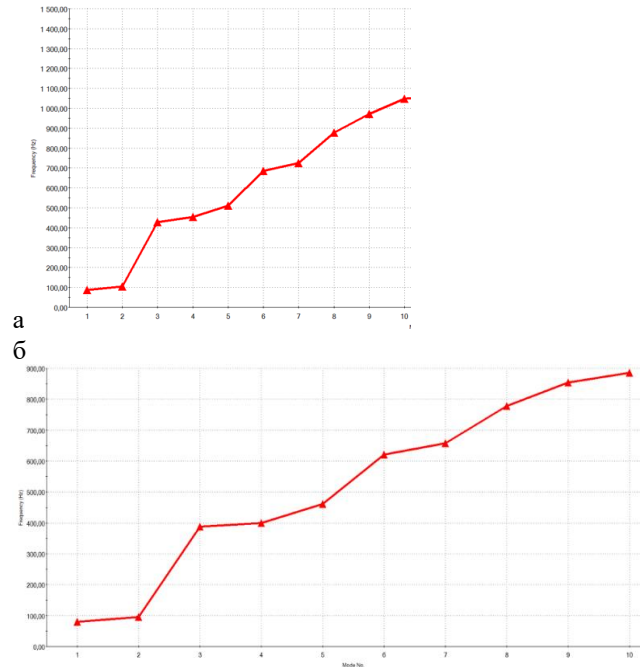


Рис. 7. Графік відгуку:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Відгук конструкції на високих частотах набагато слабший, ніж на низьких частотах.

За допомогою частотного аналізу ми повинні задовольнити умову вібростійкості, тобто власні коливання конструкції не повинні збігатися за частотою робочих коливань. Зменшення власної частоти зі зростанням товщини антивібраційного покриття призводить до нелінійного зниження частоти. Бачимо, що резонансні частоти з еластомерним покриттям зменшуються.

Створення алгоритму адаптивного вибору та застосування покриття, яке динамічно змінює свій тип або товщину залежно від поточних умов експлуатації вантажних вагонів, є складним, але перспективним завданням. Такий підхід може значно підвищити ефективність захисту, оптимізувати витрати і продовжити термін служби елементів.

Розглянемо основні етапи та компоненти, які необхідні для розроблення алгоритму адаптивного вибору:

1. Збір і аналіз даних про умови експлуатації. Це фундаментальний етап, оскільки адаптивний вибір базований на даних про поточні умови. Датчики на вагоні.

Датчики вібрації/прискорення

(акселерометри): вимірювання рівня вібрацій на різних ділянках вагона (днище, борти, рама) під час руху та завантаження/розвантаження. Можна використовувати модулі на кшталт NI 9237 у поєднанні з тензорезисторами або окремі акселерометри. Датчики температури: моніторинг температури зовнішнього середовища та поверхні вагона. Датчики вологості: моніторинг вологості повітря. Датчики ударів/навантаження: наприклад, тензодатчики ДЭДВУ-20 для контролю за ударними навантаженнями під час завантаження/розвантаження. GPS/Системи позиціонування: для визначення маршруту і погодних умов у регіоні.

Інформація про вантаж. Тип вантажу: абразивний (щебінь, руда, вугілля), хімічно активний (сіль, міңдобрива), рідкий, сипкий тощо. Об'єм/Маса вантажу: впливає на навантаження та вібрації. Стан інфраструктури: тип залізничної колії, стан розвантажувальних механізмів.

2. Моделювання та прогнозування. Для розуміння, як різні умови впливають на поведінку вагона та покриття. Математичні моделі (динамічні моделі вагона): із використанням програмного забезпечення Ansys LS-DYNA (для ударних навантажень) або MSC.Marc (для нелінійного аналізу деформацій) можна моделювати реакцію вагона на різні навантаження та вібрації.

Моделі поведінки покриття: як різні типи полімерних покриттів (поліуретани, полісечовини, ПВХ-композити) і їхня товщина впливають на вібродемпфуючі та шумопоглинаючі властивості за різних температур і частот.

Прогнозування зносу та деградації: розроблення моделей, які прогнозують швидкість зносу або корозії покриття залежно від типу вантажу, інтенсивності вібрацій і зовнішніх умов.

3. Створення бази даних із детальними характеристиками різних типів покриттів. Тип покриття: поліуретанове, полісечовинне, бітумно-полімерне, ПВХ-композитне тощо. Фізико-механічні властивості: віброгасіння (коефіцієнт демпфування, втрати енергії на різних частотах), зносостійкість (стійкість до абразивного зносу), міцність на розрив, відносне видовження, твердість, за Шором, хімічна стійкість, температурна стійкість, товщина (оптимальний діапазон товщин для кожної властивості), вартість (вартість матеріалу та нанесення). Технологія нанесення (вимоги до обладнання, часу затвердіння).

Рекомендації щодо впровадження цієї системи вибору покриттів для підвищення довговічності вагонів і збереження вантажів:

- включити модуль адаптивного покриття в технічні умови на виготовлення нових типів вагонів;
- здійснити типові випробування на найбільш вібронавантажених елементах (хребтова та шворнева балки);

- у межах державної програми модернізації вагонного парку передбачити часткове фінансування розгортання технології в депо;

- створити електронну базу даних умов експлуатації для формування динамічної системи рекомендацій щодо вибору покриття.

Запровадження системи адаптивного вибору антивібраційного покриття є ефективним шляхом для підвищення експлуатаційної надійності вантажних вагонів, зменшення технічних витрат і забезпечення високого рівня збереження вантажів. Розвиток такого напрямку сприятиме переходу до більш гнучкої, ресурсозберігаючої та цифровізованої залізничної логістики.

Висновки.

Розроблений класифікаційний підхід забезпечує систематизований вибір антивібраційних захисних покриттів, значно підвищуючи ефективність процесів проектування та експлуатації вантажних вагонів.

Використання запропонованої класифікації дає змогу істотно скоротити час і матеріальні ресурси на підбір оптимальних покриттів, мінімізуючи метод «спроб і помилок».

Встановлено, що диференціація елементів вантажних вагонів за їхнім функціональним призначенням та умовами експлуатації є основою для точного визначення вимог до антивібраційного захисту.

Обґрунтовано необхідність урахування спектрального складу вібраційних навантажень для вибору покриттів, оскільки це безпосередньо впливає на їхні демпфуючі властивості.

Доведено, що фізико-механічні властивості захисних покриттів (модуль пружності, коефіцієнт втрат, густина) мають бути інтегровані в класифікаційний підхід для об'єктивного оцінювання їхньої ефективності.

Застосування еластомерних покриттів у конструкції візків вантажних вагонів: підвищує надійність і довговічність вагонів, зменшує витрати на обслуговування, покращує безпеку руху, забезпечує адаптацію підвісної системи до сучасних вимог швидкості та навантаження.

Запропонований підхід дає змогу прогнозувати довговічність і надійність елементів вантажних вагонів, оброблених антивібраційними покриттями, в умовах інтенсивних вібраційних навантажень.

Виявлено, що економічна доцільність застосування різних типів покриттів суттєво залежить від їхньої ціни, складності нанесення та очікуваного терміну служби.

Класифікація включає критерії екологічної безпеки та утилізації матеріалів, що є важливим аспектом для сучасного вагонобудування та експлуатації.

Практична апробація підходу на реальних елементах вантажних вагонів підтвердила його високу

точність і адаптивність до різних експлуатаційних умов.

Запропонована методика сприяє уніфікації та стандартизації процесів вибору антивібраційних покриттів у вітчизняній і світовій практиці вагонобудування.

Висновки дослідження можуть бути використані для розроблення галузевих рекомендацій і нормативних документів щодо застосування антивібраційних покриттів на залізничному транспорті.

Імплементация класифікаційного підходу дасть змогу зменшити динамічні навантаження на колії та рухомий склад, подовжуючи термін їхньої експлуатації та знижуючи витрати на ремонт.

Отримані результати відкривають перспективи для розроблення нових поколінь антивібраційних матеріалів із покращеними характеристиками, орієнтованих на конкретні умови експлуатації вантажних вагонів.

Список використаних джерел

1. Chen Y., Wang J., & Zhang L. (2021). *Vibration damping properties of polymer-based composites for freight wagon applications*. *Journal of Sound and Vibration*. 501. 116074. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116074>.
2. Gupta A. & Kumar R. (2020). *Advanced anti-vibration coatings for rail transport: A review*. *Materials Today: Proceedings*. 28(3). 1422–1428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.809>.
3. Ivanov S., Petrov V. & Kozlov A. (2022). *Evaluation of viscoelastic materials for vibration reduction in freight car components*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 102. 103125. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103125>.
4. Lee H. & Kim D. (2023). *Classification of vibration damping materials based on mechanical properties and application to rail vehicles*. *Composite Structures*. 305. 116497. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116497>.
5. Liu B. & Zhang G. (2020). *Design and optimization of multi-layer coatings for vibration isolation in heavy-haul wagons*. *Journal of Vibration and Control*. 26(15-16). 1353–1365. <https://doi.org/10.1177/1077546320911096>.
6. Martínez F. & García E. (2021). *New trends in anti-vibration coatings for railway applications*. *Coatings*. 11(5). 543. <https://doi.org/10.3390/coatings11050543>.
7. Park S. & Jung W. (2022). *A comparative study of rubber-based and polyurethane-based damping materials for freight wagons*. *Materials*. 15(8). 2901. <https://doi.org/10.3390/ma15082901>.
8. Patel R. & Thompson M. (2023). *Finite element analysis of vibration damping in freight wagon components using composite coatings*. *Engineering Structures*. 274. 115182. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115182>.
9. Qin Y. & Zhao X. (2020). *Dynamic performance of freight wagons with different anti-vibration coatings under load variations*. *Vehicle System Dynamics*. 58(6). 923–941. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1623386>.
10. Silva C. & Santos P. (2021). *Experimental assessment of viscoelastic damping materials for railway applications*. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 30(7). 5267–5276. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05799-w>.
11. Smith J. & Brown K. (2022). *A systematic approach to selecting vibration damping materials for rail freight components*. *Construction and Building Materials*. 320. 126291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126291>.
12. Tanaka H. & Watanabe T. (2020). *Development of high-performance damping coatings for heavy transport vehicles*. *International Journal of Rail Transportation*. 8(3). 245–261. <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1708005>.
13. Wang L. & Li X. (2023). *Machine learning-based classification of anti-vibration materials for railway use*. *Smart Materials and Structures*. 32(4). 045015. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acc245>.
14. Yang M. & Chen Z. (2021). *Dynamic behavior of freight wagons with different damping treatments under impact loading*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 235(5). 633–645. <https://doi.org/10.1177/0954409720958941>.
15. Zhang R. & Liu Y. (2022). *Experimental and numerical study on vibration attenuation of freight wagon components using hybrid coatings*. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 10(2). 489–502. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00395-7>.
16. 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. Iss. 5 (1). P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8.
17. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. *Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock*. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080.
18. Zhao H. & Wei J. (2020). *A review of damping technologies for railway freight vehicles*. *Applied Acoustics*. 166. 107347. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107347>.
19. Zhou P. & Xu D. (2023). *Optimization of composite coatings for vibration reduction in rail freight transport*. *Composite Part B: Engineering*. 248. 110382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110382>.

20. Zhu K. & Li W. (2021). *Performance evaluation of elastomeric coatings for vibration control in heavy-haul wagons*. *Wear*. 476-477. 203654. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203654>.

21. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 2(7). С. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2).

22. 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. <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>.

23. Kumar S. & Sharma N. (2022). *Recent advances in polymer-based damping materials for railway applications*. *Polymer Testing*. 112. 107628. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107628>.

24. Feng X. & Li G. (2023). *A decision-making framework for selecting anti-vibration coatings in rail freight transport*. *Advanced Engineering Materials*. 25(4). 2200985. <https://doi.org/10.1002/adem.202200985>.

CLASSIFICATION APPROACH TO SELECTING ANTI-VIBRATION PROTECTIVE COATINGS FOR FREIGHT CAR COMPONENTS

Dr. Sc. (Tech.) O. V. Fomin, postgraduate student O. S. Kozynka

Abstract. The article presents a classification-based approach to the selection of anti-vibration protective coatings for components of freight wagons. A classification system is proposed that considers key operational factors, types of vibration loads, physical and mechanical properties of coating materials, and the structural specifics of wagon elements. This approach enables optimization of the coating selection process to improve the durability and reliability of railway rolling stock. A systematic analysis of vibration sources occurring during freight wagon operation and their impact on structural components and cargo is conducted. Typical sources of mechanical oscillations are described, and the most highly loaded zones for various types of wagons are identified. Modern polymer-based anti-vibration materials used for structural vibration protection are reviewed. Methods for selecting damping coatings based on cost-effectiveness for components such as the center sill and the body of open-top wagons are proposed. An optimal selection strategy is introduced, taking into account the material of the wagon's structural elements, cargo type, vibration load intensity, and climatic operating conditions. The prospects for using hybrid and multilayer damping systems are highlighted. The study results can be applied in the design,

modernization, and maintenance of freight wagons in accordance with modern vibration protection requirements. Various research methods were employed, including systems analysis for a comprehensive study of vibration issues and current mitigation approaches. A classification approach was used to structure and generalize information on different types of anti-vibration coatings. Experimental methods were applied to assess the performance of coatings under conditions close to real operation. Comparative analysis helped identify optimal solutions among available options, while mathematical modeling techniques may have been used to forecast material behavior. Finally, expert evaluation contributed to formulating recommendations for coating selection.

Keywords: railway transport, transport technologies, freight wagons, maintenance, operation, reliability, load-bearing systems, protective coatings, automation, computer modeling.

Фомін Олексій Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>.

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

Козинка Олександр Сергійович, аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>.

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

Fomin Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), professor, Dr. Sc. (Tech.), professor, professor of the Department of wagon Cars and Wagon Management, Kyiv Institute of Railway Transport of the National Transport University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>.

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

Kozynka Oleksandr, postgraduate student of the Department of wagon Cars and Wagon Management, Kyiv Institute of Railway Transport of the National Transport University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>. Tel.: +38 (093) 376-13-73. E-mail: kozynka1520mm@gmail.com.