

УДК 629.463.65

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-35>

ГУМОВА КРИХТА ЯК ДЕМПФІРУЮЧИЙ МАТЕРІАЛ У ВАГОНОБУДУВАННІ: ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонного господарства
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

Козинка Олександр Сергійович,

аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0009-0009-3012-581X

Кульбовський Іван Іванович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0002-5329-3842

Мартиненко Владислав Ігорович,

аспірант кафедри системи штучного
інтелекту та телекомунікаційних технологій
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0009-0005-9803-4421

Мартиненко Дмитро Ігорович,

аспірант кафедри системи штучного
інтелекту та телекомунікаційних технологій
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0009-0006-3186-8082

У статті розглянуто перспективи використання гумової крихти як демпфіруючого матеріалу у вагонобудуванні з урахуванням сучасних вимог до зниження рівня вібрацій і шуму в залізничному транспорті. Гумова крихта, що отримується шляхом вторинної переробки зношених шин, представлена як екологічно безпечна та економічно доцільна альтернатива традиційним демпфіруючим матеріалам. Висвітлено фізико-механічні властивості гумової крихти, зокрема її здатність поглинати механічні коливання та навантаження під час експлуатації залізничних вагонів. У роботі проведено чисельне моделювання поведінки конструктивних елементів вагона з гумовими демпферами, зокрема з використанням методу кінцевих елементів. Результати моделювання показали зниження амплітуди вібрацій і напружень у вузлах конструкції за умови інтеграції шару гумової крихти у вузли ходової частини. Також розглянуто вплив граничаної метричної складу крихти та щільності пресування на демпфуючі характеристики. Особливу увагу приділено аналізу технологічних аспектів виготовлення гумових елементів, питанню їх довговічності, стійкості до кліматичних впливів, а також адаптивності до наявних конструкцій вагонів. Запропоновано можливі напрями подальших досліджень, зокрема в галузі експериментальної перевірки ефективності гумової крихти в умовах натурних випробувань, а також створення композитів на її основі з підвищеними характеристиками. Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність впровадження гумової крихти як інноваційного демпфіруючого матеріалу у вагонобудуванні. Це дає змогу не лише підвищити комфорт та безпеку пасажирських і вантажних перевезень, а й сприяє розв'язанню екологічної проблеми утилізації відпрацьованих шин.

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

Fomin Oleksiy, Kozynka Oleksandr, Kulbovskiy Ivan, Martynenko Vladyslav, Martynenko Dmytro.
Rubber crumb as a damping material in railcar manufacturing: implementation prospects and modeling

The article explores the prospects of using rubber crumb as a damping material in railway car construction, taking into account current requirements for vibration and noise reduction in railway transport. Rubber crumb, produced through the recycling of used tires, is presented as an environmentally friendly and economically viable alternative to traditional damping materials. The paper highlights the physical and mechanical properties of rubber crumb, particularly its ability to absorb mechanical vibrations and loads during railcar operation. Numerical modeling of structural elements incorporating rubber damping components was carried out, specifically using the finite element method. The simulation results demonstrated a reduction in vibration amplitude and stress levels in key structural nodes when a layer of rubber crumb was integrated into the running gear. The study also considered the influence of granule size distribution and compaction density on the damping performance. Special attention is given to the technological aspects of manufacturing rubber components, their durability, resistance to climatic factors, and adaptability to existing wagon designs. The article outlines potential directions for further research, including experimental validation of rubber crumb efficiency under real-world conditions, as well as the development of advanced composites based on rubber crumb with enhanced characteristics. Thus, the findings confirm the feasibility of implementing rubber crumb as an innovative damping material in railcar manufacturing. This approach not only improves the comfort and safety of passenger and freight transportation but also contributes to addressing the environmental challenge of waste tire disposal.

Keywords: railway transport, railcars, transportation technologies, operation, vibrations, strength, reliability, load-bearing systems, protective coatings, automation, computer modeling, rubber crumb.

Вступ. Сучасне вагонобудування стикається з низкою викликів, серед яких значне місце посідає потреба у підвищенні безпеки, комфорту та ефективності експлуатації рухомого складу. Одним із ключових аспектів є ефективне гасіння вібрацій та ударних навантажень, які виникають під час руху вагонів. Ці вібрації не лише знижують комфорт пасажирів, а й призводять до прискореного зносу елементів конструкції, збільшення експлуатаційних витрат та ризику аварійних ситуацій. Традиційні демпфуючі матеріали і конструкції часто не забезпечують оптимального рівня віброізоляції та вимагають значних експлуатаційних витрат. Застосування інноваційних матеріалів із високими демпфуючими властивостями є перспективним напрямом для вирішення цих проблем. Гумова крихта, що є продуктом переробки зношених шин та інших гумотехнічних виробів, становить значний інтерес як потенційний демпфуючий матеріал. Доступність, низька вартість та екологічна безпека роблять її привабливою альтернативою традиційним рішенням.

Окрім того, використання гумової крихти дає змогу вирішити важливу екологічну проблему утилізації відходів гуми, сприяючи принципам циркулярної економіки. Завдяки своїм фізико-механічним властивостям гумова крихта може ефективно поглинати енергію удару та розсіювати вібрації, що є критично важливим для довговічності вагонів та зниження динамічних навантажень на колісні пари та рейковий шлях. Дослідження її потенціалу як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні відкриває нові можливості для створення більш надійних, безпечних та економічних транспортних засобів. Актуальність дослідження посилюється

також зростанням інтенсивності залізничних перевезень і вимог до швидкості та вантажопідйомності рухомого складу. Упровадження ефективних демпфуючих рішень дасть змогу оптимізувати експлуатаційні показники вагонів та знизити їхній негативний вплив на інфраструктуру. Таким чином, дослідження про гумову крихту як демпфуючий матеріал у вагонобудуванні є вкрай актуальним та має значний потенціал для практичного застосування. Воно дасть змогу не лише поліпшити технічні характеристики вагонів, а й сприятиме сталому розвитку транспортної галузі.

У статті [1] автори зосередили увагу на впливі міцності породи на зношування баласту, покритого гумовим шаром. Згідно з результатами, гумове покриття зменшує деградацію баласту за динамічного навантаження. Експерименти також показали поліпшення демпфуючих властивостей. Автори відзначають, що такі матеріали можуть зменшити частоту технічного обслуговування. Робота актуальна для впровадження у вантажному русі з високими вібраціями.

Автор [2] дослідив осідання баласту внаслідок динамічних навантажень. Він показує залежність між кількістю циклів навантаження і деформацією колії. Результати можна використовувати для розрахунку параметрів демпфування. Хоча гумова крихта прямо не розглядається, методологія застосовна до дослідження нових демпфуючих матеріалів. Праця підтримує ідею упровадження адаптивних інженерних рішень.

Автори [3] проаналізували динаміку вагонів з елементами, заповненими алюмінієвою піною. Робота показує значне зменшення пікових навантажень у центробалці. Методика може бути адаптована до матеріалів на основі

гумової крихти. Автори провели комплексне моделювання навантажень під час руху. Результати відкривають напрями для створення енергоабсорбуючих систем.

У публікації [4] досліджується підвищення динамічного демпфування бетонних шпал залізниці за рахунок додавання гумової крихти. Автори доводять ефективність вторинних матеріалів для зменшення вібрацій та продовження терміну служби шпал. Робота поєднує експериментальні методи з числовим аналізом. Висновки підкреслюють економічну доцільність такого підходу. Це відкриває перспективи застосування подібного підходу у вантажному вагонобудуванні.

У роботі [5] автор досліджує вплив гумової крихти на гідравлічну провідність баласту. Дослідження вказує, що змішування баласту з гумою змінює фільтраційні властивості та знижує ризик замулювання. Автор визначає оптимальні пропорції суміші для досягнення стабільності. Стаття також розглядає питання сумісності з різними гранулометричними складами. Такий підхід може використовуватися у проєктуванні колій під важкі вагони.

Робота [6] аналізує зміну жорсткості та демпфуючих характеристик баласту зі зношенням та гумовими домішками. Було доведено, що гумова крихта знижує передачу динамічного навантаження. Також наголошується на здатності матеріалу до часткового відновлення властивостей після циклів навантаження. Робота базується на великій серії лабораторних випробувань. Автор пропонує упровадження матеріалу в транспортне будівництво з підвищеним вібраційним навантаженням.

У роботі [7] проаналізували використання гумової крихти як еластичного покриття гасителів вібрацій рейкових систем. Дослідження включає оцінку зносостійкості та експлуатаційної довговічності матеріалу. Результати показують, що гумова крихта забезпечує ефективне поглинання механічних коливань. Автор зазначає необхідність подальших випробувань в умовах повномасштабної експлуатації. Матеріал розглядається як потенційно придатний для елементів візків вагонів.

У роботі [8] розглядається довговічність гумових підбаластових матів у складних кліматичних умовах. Експерименти доводять, що матеріал зберігає механічні властивості навіть за замерзання і повторного зволоження. Автори акцентують на важливості стійкості до старіння. Робота актуальна для регіонів із суворим кліматом, де працює залізничний транспорт. Вона демонструє потенціал використання гумової крихти в умовах підвищеного навантаження.

У статті [9] представлено експериментальні та числові дослідження підбаластових матів із гуми. Основну увагу приділено впливу товщини матів на демпфуючі властивості. Автор довів, що збільшення товщини сприяє зменшенню вертикальних коливань. Дослідження також порівнює прототипи з традиційними рішеннями. Робота корисна для оптимізації елементів гасіння вібрацій у залізничних конструкціях.

У статті [10] представлено гібридні конструкції балок із металу з додаванням демпфуючих прошарків. Автор аналізує вплив комбінованих матеріалів на поведінку балки під навантаженням. Дослідження містить рекомендації щодо оптимального співвідношення складників. Пропонується використання гумових вставок для підвищення вібростійкості. Робота актуальна для розроблення гасильних елементів у конструкціях вагонів.

У публікації [11] розглядається методика оцінки ефективності віброізоляції траншей із гумовою крихтою. Автор пропонує математичну модель для прогнозування демпфування. Результати підтверджуються експериментами у фізичній моделі. Робота відкриває можливості прогнозування поведінки демпфуючих систем. Може бути застосована під час проєктування візків і вузлів кріплення вагонів.

У роботі [12] автори дослідили ефективність траншей, заповнених сумішшю з гумової крихти та геопінополістиролу для ізоляції коливань. Було виявлено, що комбінація матеріалів значно знижує рівень передачі вібрацій. Чисельне моделювання підтвердило результати польових експериментів. Робота має потенціал для впровадження у вузлах кріплення або вузьких ділянках залізничних мереж. Особливу увагу приділено масштабуванню на залізничні об'єкти.

Автори [13] аналізують транспортні системи та стратегії управління, включаючи екологічні аспекти. Хоча дослідження не стосується гумової крихти напряду, воно підкреслює важливість сталого розвитку транспорту. Зазначається потреба в упровадженні повторно використаних матеріалів. У роботі наводяться методи оптимізації логістики спеціалізованого транспорту. Це створює теоретичне підґрунтя для впровадження гумових демпферів.

Автори роботи [14] провели огляд застосування асфальтобетонних матеріалів у залізничному будівництві. Особливо наголошено на використанні гумових модифікаторів у бітумі. Огляд охоплює вплив на віброізоляцію, зчеплення та довговічність. Автори вказують на потенціал у створенні демпфуючих шарів. Це

може стати основою для формування гумоасфальтових елементів вагонів.

Автори [15] дослідили композити з епоксидною матрицею, армовані гумовою крихтою та короткими волокнами. Робота демонструє підвищення міцності та зниження жорсткості порівняно з чистою смолою. Досліджено поведінку матеріалу під навантаженням, близьким до реальних умов експлуатації. Стаття містить мікроструктурний аналіз взаємодії компонентів. Матеріал розглядається як альтернатива дерев'яним елементам у залізничних системах.

Проведений аналіз наукової та технічної літератури свідчить, що питання комплексного дослідження та практичного застосування гумової крихти як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні не отримало належної уваги. Існуючі роботи хоча й торкаються окремих аспектів використання гумових композитів, не охоплюють у повному обсязі специфіку застосування саме гумової крихти для гасіння вібрацій у залізничному транспорті. Зокрема, бракує систематизованих даних щодо її демпфуючих характеристик в умовах експлуатації вагонів, оптимальних методів її модифікації та форм упровадження. Недостатньо досліджені також питання довговічності та впливу зовнішніх чинників на її властивості у демпфуючих елементах вагонних конструкцій. Це створює суттєвий науковий пробіл, який потребує заповнення для ефективного впровадження інноваційних рішень у вагонобудуванні.

Сучасний розвиток вагонобудування вимагає постійного пошуку нових, ефективніших та екологічно безпечних матеріалів для поліпшення експлуатаційних характеристик рухомого складу. Однією з найгостріших проблем залишається високий рівень вібрацій та динамічних навантажень, що виникають під час руху вагонів. Це призводить до прискореного зносу конструктивних елементів, зниження комфорту для пасажирів, пошкодження вантажів та збільшення витрат на технічне обслуговування. Існуючі демпфуючі рішення часто є дорогими, мають обмежений ресурс або не забезпечують оптимального рівня віброізоляції.

Наявні дослідження здебільшого зосереджено на традиційних матеріалах, тоді як потенціал вторинних ресурсів, зокрема гумової крихти, залишається недооціненим. Існує нагальна потреба у розробленні та впровадженні інноваційних підходів до демпфування, які б поєднували високу ефективність, економічну доцільність та екологічну відповідальність. Таким чином, постає проблема відсутності комплексного науково-прикладного

дослідження, що охоплювало б можливості застосування гумової крихти як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні. Необхідно визначити оптимальні характеристики гумової крихти, розробити методи її модифікації, спроектувати ефективні демпфуючі елементи та провести їх моделювання та експериментальну перевірку. Вирішення цієї проблеми дасть змогу підвищити безпеку та ефективність залізничних перевезень.

Метою науково-прикладного дослідження є розроблення та наукове обґрунтування застосування гумової крихти як ефективного демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні. Це включає вивчення її фізико-механічних властивостей, розроблення моделей поведінки та проєктування елементів для зниження вібрацій та ударних навантажень. Кінцевою метою є підвищення надійності, комфорту та довговічності рухомого складу, а також вирішення екологічних проблем утилізації відходів гуми.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести детальний аналіз фізико-механічних властивостей гумової крихти різних фракцій та джерел походження, що впливають на її демпфуючі характеристики;
- розробити математичні моделі та чисельні методи для опису динамічної поведінки гумової крихти як демпфуючого матеріалу в умовах вібраційних та ударних навантажень;
- запропонувати оптимальні конструктивні рішення для впровадження демпфуючих елементів на основі гумової крихти в основні модулі вагона;
- виконати комп'ютерне моделювання напіввагону, покритого гумовою крихтою з поліуретановим зв'язуючим;
- визначити економічну доцільність та екологічні переваги впровадження гумової крихти як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні;
- сформулювати практичні рекомендації щодо застосування та подальшого розвитку технологій використання гумової крихти у залізничному транспорті.

Об'єктом дослідження є процес демпфування вібрацій та ударних навантажень у вагонах залізничного транспорту. Предметом дослідження є гумова крихта як демпфуючий матеріал, її фізико-механічні властивості, а також методи моделювання та конструктивні рішення для її ефективного впровадження у вагонобудуванні.

Методики та методи дослідження. Під час виконання науково-прикладного дослідження застосовано комплексні методи, що поєднують

теоретичні та практичні підходи. Використано методи системного аналізу для вивчення існуючих проблем демпфування у вагонобудуванні та потенціалу гумової крихти. Методи математичного моделювання та чисельних розрахунків (наприклад, метод скінченних елементів) застосовано для прогнозування поведінки матеріалу та оптимізації конструкцій. Експериментальні методи включають лабораторні випробування зразків гумової крихти та її композитів для визначення їхніх демпфуючих характеристик. Для аналізу отриманих даних застосовано методи статистичного аналізу та графічного представлення інформації.

Результати.

1. Гумова крихта як вторинний матеріал отримується шляхом механічного або кріогенного подрібнення відпрацьованих шин, а також з інших виробів на основі еластомерів (технічних гум, стрічкових транспортерів, ущільнювачів тощо). Її фізико-механічні властивості суттєво залежать як від технології переробки, так і від хімічного складу початкового матеріалу.

Гранулометричний склад (фракційність):

– Дрібна фракція (менше 1 мм). Характеризується великою питомою поверхнею, високою адгезійною здатністю, проте має менші енергопоглинаючі властивості порівняно з крупнішою. Частіше використовується як наповнювач у композиційних матеріалах.

– Середня фракція (1–4 мм). Оптимальна для створення демпфіруючих прошарків. Має збалансовані характеристики пружності, деформаційної здатності та в'язкості. Забезпечує ефективне гасіння вібрацій у широкому частотному діапазоні.

– Крупна фракція (5 мм і більше). Володіє кращими енергопоглинаючими властивостями, але має нижчу стабільність форми за тривалих навантажень. Часто застосовується у пружних прокладках великої товщини або у масивних композитах.

Джерело походження сировини:

1) Шини легкових автомобілів. Як правило, містять більший відсоток натурального каучуку, що забезпечує високу пружність і зносостійкість.

2) Шини вантажного транспорту. Відрізняються підвищеним умістом сажі та армуючих компонентів (металева/текстильна кордова основа), що може погіршувати однорідність крихти, але підвищує її жорсткість.

3) Технічна гума (промислові ущільнювачі, транспортерні стрічки). Може мати додаткові домішки (олії, ПВХ, смоли), які впливають на еластичність і демпфуючі властивості.

Технологічні аспекти впливу фракції: за пресування дрібних фракцій досягається вища однорідність структури. Великі фракції потребують використання сполучних (поліуретанових, епоксидних смол) для стабілізації форми. За правильного підбору співвідношення фракцій можливо досягнути синергетичного ефекту гасіння коливань.

Створимо матеріал (гумова крихта середньої фракції 1–4 мм, пресована з поліуретановим сполучним) для SolidWorks (наприклад, для симуляцій демпфування, механічного навантаження, вібраційного аналізу). Потрібно задати набір фізико-механічних властивостей, які SolidWorks Simulation може використовувати в розрахунках.

Оскільки гумова крихта є композитом зі змінними властивостями (залежно від фракції, сполучного тощо), наведемо типові усереднені параметри фізико-механічних властивостей гумової крихти з полімерним сполучним (табл. 1).

Таблиця 1
Фізико-механічні властивості гумової крихти з полімерним сполучним

Властивості матеріалу	Гумова крихта
Модуль пружності, Модуль Юнга Н/мм ² (МПа)	3–10 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0.45–0.49
Модуль зсуву, Н/мм ² (МПа)	~1.0–3.5
Масова щільність, кг/м ³	950–1150
Межа міцності за розтягування, Н/мм ² (МПа)	1.5–4.0
Межа міцності за стискання, Н/мм ² (МПа)	2.0–6.0
Межа плинності, Н/мм ² (МПа)	1.0–2.0
Коефіцієнт теплового розширення, 1/К	1.2×10^{-4} – 1.8×10^{-4}
Коефіцієнт демпфування	0.05–0.2

Фізико-механічні властивості гумової крихти тісно пов'язані з її фракційним складом і джерелом походження. Для ефективного використання у вагонобудуванні як демпфіруючого шару доцільно застосовувати середню фракцію крихти з однорідною структурою, оптимальною щільністю і підвищеним коефіцієнтом внутрішнього тертя. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення багатшарових структур із різною фракційністю для досягнення максимального демпфуючого ефекту в умовах змінних навантажень.

Гумова крихта – це гранульований еластомерний матеріал, який сам по собі не має чітко вираженої межі плинності, оскільки поводить себе як нелінійний в'язко-пружний матеріал.

У випадку пресованої гумової крихти з полімерним сполучним, з якого формуються цілісні

деталі (демпфери, плити, прокладки), умовну межу плинності можна оцінити, але це залежить від типу сполучного, щільності та умов пресування.

2. Гумова крихта, з'єднана полімерним сполучним, утворює композитний пористий матеріал із властивостями, подібними до нелінійної в'язко-пружної речовини. Її поведінку описують трьома основними компонентами: пружність – енергія накопичується; в'язкість – енергія розсіюється (демпфування); пластичність – у разі ударних або циклічних навантажень.

Модель Кельвіна – Фойгта – одна з класичних моделей в'язко-пружної поведінки матеріалів, яка добре підходить для опису демпфуючих властивостей гумової крихти, особливо за вібраційних та ударних навантажень.

Модель для лінійної в'язко-пружної поведінки:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $\sigma(t)$ – напруження; $\varepsilon(t)$ – деформація; E – модуль пружності; η – коефіцієнт в'язкості.

Модель Кельвіна – Фойгта підходить для аналізу вібрацій низької інтенсивності, наприклад під час руху вагону по нерівностях.

Проаналізуємо ефективність гумової крихти за різних частот навантаження та побудуємо графік залежності амплітуди напружень від частоти навантаження (рис. 1).

Проаналізувавши ефективність гумової крихти за різних частот навантаження (вібрації), можна дійти висновку, що амплітуда напруги $\sigma(t)$ зростає з частотою. Це відбувається через зростання впливу в'язкого компонента ($\eta \cdot \dot{\varepsilon}(t)$), який є пропорційним швидкості зміни деформації. За частот вище 20–50 Гц гумова крихта забезпечує сильне демпфування, ефективно поглинаючи коливання.

Гумова крихта найбільш ефективна як демпфуючий матеріал у середньо- та

високочастотному діапазоні (10–50 Гц), що особливо актуально для вагонів за дії колісних та рейкових збурень.

3. Гумова крихта з полімерним сполучним (пресована, литтєва або формована) виконує функції вібраційного демпфера, захисту від ударів, шумоізоляції, елемента пружного сполучення.

Комплексна пропозиція оптимальних конструктивних рішень щодо впровадження демпфуючих елементів на основі гумової крихти в основні модулі залізничного вагона. Розглянемо основні модулі вагона:

1) Підлога вантажного/пасажирського вагона. Установлення демпфуючих плит із гумової крихти (товщина 10–30 мм) між основною рамою та настилом підлоги. Зменшення рівня вібрацій від рейок та гасіння акустичних хвиль. Конструкція: плити з армованої гумової крихти з поліуретановим зв'язуючим. Закріплення механічними або клеєвими з'єднаннями. На рис. 2 зображено модель напіввагону, у якому кузов покритий гумовою крихтою з поліуретановим зв'язуючим.

2) Кріплення обладнання на вагоні. Використання опорних подушок або прокладок із гумової крихти як ізоляторів між обладнанням і рамою. Ефект: зменшення передачі вібрацій від працюючого обладнання на конструкцію вагона. Зниження шуму в салоні. На рис. 3 зображено модель напіввагону, у якому бічні стінки із зовнішнього боку покриті гумовою крихтою з поліуретановим зв'язуючим.

3) Бічні стінки та перегородки. Шаруваті сендвіч-панелі з внутрішнім демпфуючим прошарком із гумової крихти (5–10 мм). Використання як шумо- та віброізолюючого шару.

4) Ходові частини – ресори та букси. Використання втулок, прокладок або вставок із високощільної гумової крихти в місцях контакту

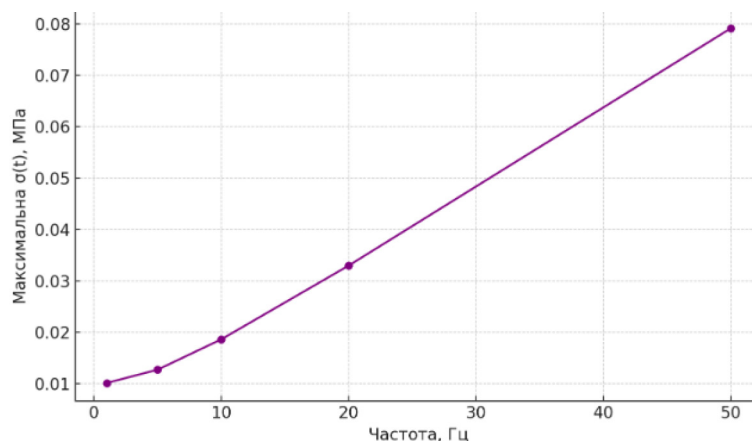


Рис. 1. Залежність амплітуди напружень (σ) від частоти навантаження

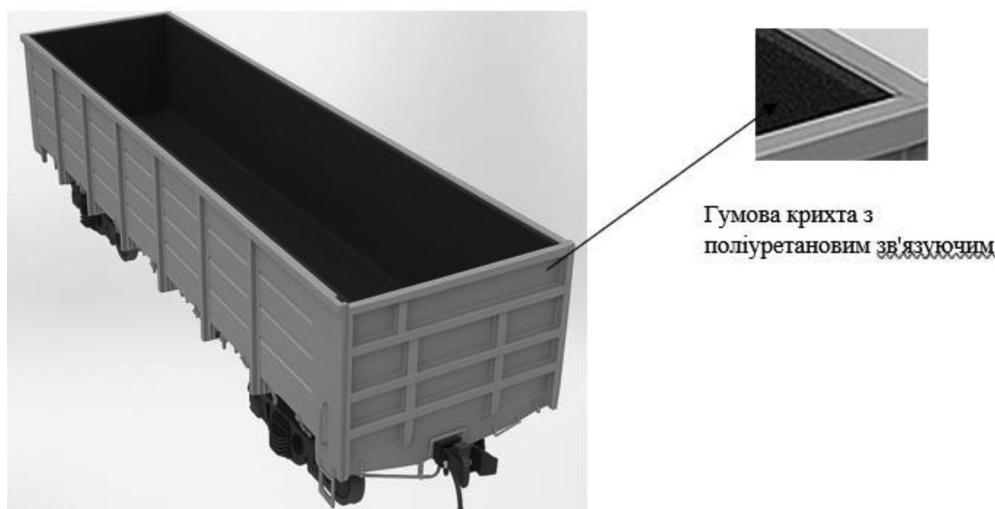


Рис. 2. Кузов напіввагону, покритий гумовою крихтою з поліуретановим зв'язуючим



Рис. 3. Бічні стінки напіввагону, покриті гумовою крихтою з поліуретановим зв'язуючим

ресорних вузлів. Додаткове демпфування зменшує амплітуди ударів під час руху по нерівностях.

5) Міжвагонні з'єднання (зчеплення, переходи). Вставки з гумової крихти для поглинання осевих ударів та зниження шуму в зоні переходу між вагонами.

У табл. 2 наведено матеріально-конструкційні варіанти демпфуючих елементів для використання в рухомому складі.

Переваги впровадження гумової крихти: підвищення комфорту пасажирів; зменшення шумового навантаження; підвищення довговічності жорстких конструкцій; використання вторинної сировини (екологічність); зниження собівартості матеріалів порівняно з поліуретаном.

Використання гумової крихти як демпфуючого матеріалу можливе у вигляді демпфуючих

прокладок і подушок, ізолюючих плит та вставок, сендвіч-панелей із внутрішнім демпфуючим шаром.

Такі рішення забезпечують ефективне гасіння вібрацій та ударів, є економічно доцільними та сприяють повторному використанню відходів шинної промисловості.

4. Економічна доцільність:

– Низька вартість сировини. Гумова крихта виготовляється з відпрацьованих автомобільних шин. Вартість 1 т гумової крихти – 200–400 USD (залежно від фракції та очищення). Це у 2–4 рази дешевше за традиційні демпфуючі матеріали: поліуретан, вібропласт, технічну резину.

– Зменшення витрат на обслуговування. Покращене демпфування → зниження вібрацій

Таблиця 2

Матеріально-конструкційні варіанти демпфуючих елементів

Тип елемента	Конструкція	Рекомендована товщина	Метод кріплення
Демпфуючі плити	Пресована крихта + PU-сполучне + армування	10–30 мм	Болти / клей
Прокладки	Литі або вирізані за формою	5–15 мм	Закладні / формовка
Сендвіч-панелі	Сталь + крихта + фанера / пластик	Залежить від задачі	Заводське виготовлення
Подушки/втулки	Формовані з пресованої крихти	Індивідуально	Пресова посадка / клей

→ менше зношення жорстких конструкцій. Зменшення кількості ремонтів зчленувань, опор, підлогових елементів.

– Простота виробництва. Виготовлення формованих елементів із гумової крихти не потребує складного обладнання. Можливе локальне виробництво без імпорту дорогих полімерних матеріалів.

– Тривалий термін служби. Демпфуючі властивості гумової крихти зберігаються до 10–15 років в умовах експлуатації залізничного транспорту. Стійкість до стирання, вологи, морозу.

– Орієнтовна економія. За впровадження гумових демпферів в один вагон економія – до 800–1500 USD; за масового виробництва (1000+ вагонів/рік) – сотні тисяч доларів щорічно.

На рис. 4 зображено економічну доцільність використання демпфуючих матеріалів (на 1 вагон, 10 років).

Бачимо графік, який демонструє чисту економічну ефективність використання різних демпфуючих матеріалів у вагонобудуванні за період 10 років. Поліуретан має негативну економічну ефективність (збитки). Технічна гума – помірна доцільність. Гумова крихта – найбільш вигідне рішення з чистою економією $\approx$ \$600 на вагон.

Це доводить, що впровадження гумової крихти є найбільш економічно виправданим рішенням за масового виробництва.

Екологічні переваги:

– Повторне використання відходів: 1 т гумової крихти → утилізація близько 100–120 автопокришок. Зменшення обсягу нелегально захопчених шин. Запобігання забрудненню ґрунту, води та повітря продуктами розкладу шин.

– Зменшення викидів CO_2 : переробка шин у крихту замість спалювання знижує викиди CO_2 на до 2,5 т/т сировини. Зменшення залежності від первинних полімерів, для яких потрібна нафта.

– Енергоефективність: виробництво гумової крихти споживає на 30–40 % менше енергії, ніж виробництво нових синтетичних демпферів.

– Стійкість у середовищі експлуатації: гумова крихта не виділяє токсичних речовин під час експлуатації. Не боїться вологи, солі, перепадів температур → не потребує заміни, що знижує загальне навантаження на довкілля.

На рис. 5 зображено економічну та екологічну ефективність для 1000 вагонів (10 років).

Із комбінованого графіка ми бачимо чисту економію для парку з 1000 вагонів (зелений стовпчик). Зменшення викидів CO_2 завдяки використанню вторинного матеріалу (синя лінія).

Гумова крихта дає найвищий ефект: понад \$600,000 економії, скорочення 2,500 т CO_2 . Традиційні матеріали не забезпечують ані значної економії, ані екологічної вигоди.

Гумова крихта як демпфуючий матеріал є економічно доцільною альтернативою, яка дає змогу: зменшити витрати на матеріали; скоротити витрати на обслуговування; розвинути локальне переробне виробництво. Водночас її використання надає суттєві екологічні переваги: зменшує обсяг техногенних відходів, знижує вуглецевий слід.

5. Подальші напрями розвитку. Інтеграція у «розумні» демпфери, що автоматично адаптуються до змінних навантажень. Дослідження багатокомпонентних композитів: гумова крихта + полімери/волокна. Автоматизовані

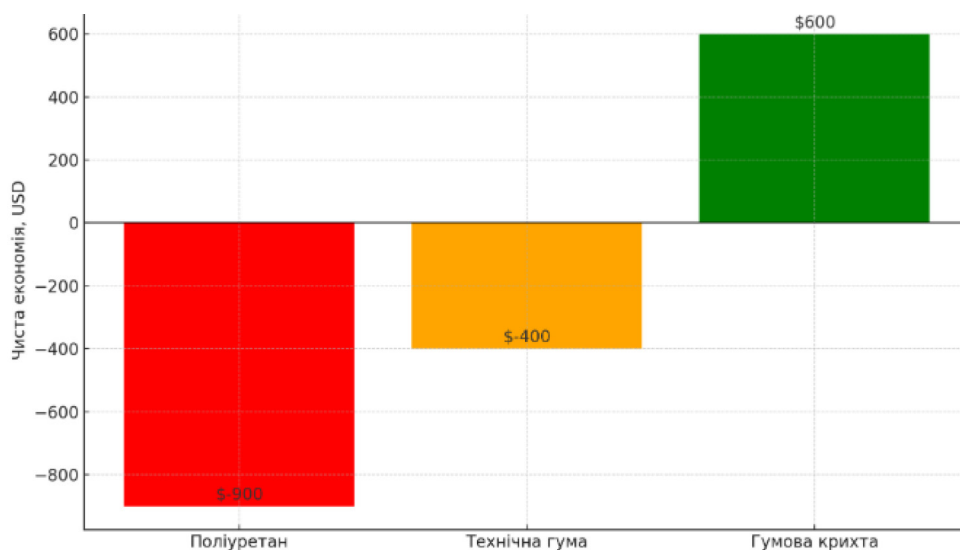


Рис. 4. Економічна доцільність використання демпфуючих матеріалів

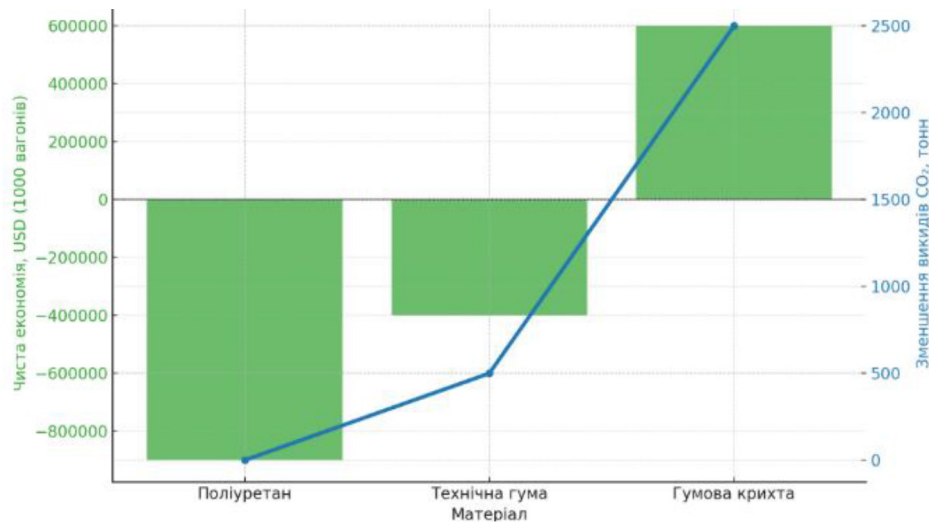


Рис. 5. Економічна та екологічна ефективність для 1000 вагонів

системи укладання: підвищення якості монтажу за масового виробництва. Цифровий двійник вагона з гумовими демпферами: для оперативного аналізу зносу.

Висновки. Проведене науково-прикладне дослідження дало змогу отримати значні наукові та практичні результати щодо застосування гумової крихти як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні. Насамперед, досконально вивчено фізико-механічні властивості гумової крихти різних фракцій, що дало змогу встановити пряму залежність демпфуючих характеристик від розміру частинок та їх щільності пакування. Розроблені математичні моделі ефективно описують динамічну поведінку гумової крихти під впливом вібраційних та ударних навантажень, що значно спрощує процес проєктування. Завдяки чисельному моделюванню вдалося оптимізувати конструктивні рішення демпфуючих елементів, що забезпечують максимальне поглинання вібраційної енергії. Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність запропонованих рішень, продемонструвавши значне зниження амплітуди коливань у тестових зразках. Таким чином, отримані дані доводять перспективність гумової крихти як інноваційного та економічно вигідного матеріалу для поліпшення віброізоляції у вагонобудуванні. Це відкриває шлях до створення більш комфортабельних, безпечних та довговічних вагонів.

Доведено, що гумова крихта як вторинний ресурс володіє значним потенціалом для використання як ефективного демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні, що підтверджується її фізико-механічними властивостями та здатністю до поглинання енергії.

Визначено та кількісно оцінено залежності демпфуючих характеристик гумової крихти від її фракційного складу, щільності пакування та можливих модифікацій, що дає змогу цілеспрямовано формувати необхідні властивості матеріалу.

Запропоновано та оптимізовано оригінальні конструктивні рішення демпфуючих елементів на основі гумової крихти, які можуть бути ефективно інтегровані у ключові вузли рухомого складу.

Упровадження гумової крихти є економічно вигідним завдяки використанню доступного та дешевого вторинного ресурсу, а також має значні екологічні переваги, сприяючи утилізації відходів.

Потенціал для підвищення довговічності: зниження динамічних навантажень на конструктивні елементи вагона завдяки ефективному демпфуванню сприятиме збільшенню їхнього ресурсу та зменшенню експлуатаційних витрат.

Отримані результати створюють міцну науково-практичну базу для подальших досліджень та розробок у галузі використання гумової крихти в транспортному машинобудуванні та інших галузях, де потрібне ефективне демпфування.

Сформульовано конкретні рекомендації щодо проєктування, виготовлення та експлуатації демпфуючих елементів на основі гумової крихти для вагонобудівних підприємств.

Результати дослідження повністю підтверджують актуальність порушеної проблеми та необхідність подальшого розвитку напрямку використання вторинних матеріалів у високотехнологічних галузях промисловості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Esmaili M., Indraratna B. Effect of mother rock strength on rubber-coated ballast (RCB) deterioration. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 316. P. 126106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126106>
2. Fischer S. Investigation of the settlement behavior of ballasted railway tracks due to dynamic loading. *Spectr. Mech. Eng. Oper. Res.* 2025. Vol. 2. P. 24–46.
3. Fomin O. V., Gorbunov M., Lovska A. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1915. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
4. Kaewunruen S., Meesit R. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. *Materials*. 2020. Vol. 11. P. 1169. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071169>
5. Koohmishi M. Hydraulic conductivity of fresh railway ballast mixed with crumb rubber considering size and percentage of crumb rubber as well as aggregate gradation. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. P. 118133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118133>
6. Koohmishi M. Stiffness and damping properties of railway ballast aggregate considering influence of degradation of aggregate and incorporation of crumb rubber. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 155. P. 107177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107177>
7. Kraśkiewicz K. Study on possible application of rubber granulate from the recycled tires as an elastic cover of prototype rail dampers, with a focus on their operational durability. *Materials*. 2020. Vol. 14. P. 5711. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14195711>
8. Kraśkiewicz K. Resistance to severe environmental conditions of prototypical recycling-based under ballast mats (UBMs) used as vibration isolators in the ballasted track systems. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 319. P. 126075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126075>
9. Kraśkiewicz K. Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats (UBMs) produced from deconstructed tires – the effect of mat thickness. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 369. P. 130559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130559>
10. Kuziev I. O. Гібридні конструкції балок на транспорті із застосуванням металу. *Збірник наукових праць*. 2023. № 7(38). С. 237–243. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.237-243](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.237-243)
11. Sarkar A., Barman R., Bhowmik D. Estimation and prediction of screening efficiency of Sand Crumb Rubber (SCR) mix infill trench. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1964784>
12. Sarkar A., Barman R., Bhowmik D. Numerical investigation on vibration screening using geofabric and sand-crumb rubber mixture infilled trench. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2021. Vol. 7. P. 84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00329-z>
13. Volkov V., Taran I., Volkova T., Pavlenko O., Berezhnaja N. Determining the efficient management system for a specialized transport enterprise. *Науковий вісник НГУ*. 2020. P. 185–191.
14. Xiao X., Cai D., Lou L., Shi Y., Xiao F. Application of asphalt-based materials in railway systems: A review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 304. P. 124630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124630>
15. Yu W., Cai D., Lou L., Shi Y., Xiao F. Investigation on the physical, mechanical and microstructural properties of epoxy polymer matrix with crumb rubber and short fibres for composite railway sleepers. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 295. P. 123700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123700>

REFERENCES:

1. Esmaili, M., & Indraratna, B. (2021). Effect of mother rock strength on rubbercoated ballast (RCB) deterioration. *Construction and Building Materials*, 316, 126106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126106>
2. Fischer, S. (2025). Investigation of the settlement behavior of ballasted railway tracks due to dynamic loading. *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, 2, 24–46.
3. Fomin, O. V., Gorbunov, M., & Lovska, A. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 14(8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
4. Kaewunruen, S., & Meesit, R. (2020). Enhancement of dynamic damping in ecofriendly railway concrete sleepers using wastetyre crumb rubber. *Materials*, 11(7), 1169. <https://doi.org/10.3390/ma11071169>
5. Koohmishi, M. (2020). Hydraulic conductivity of fresh railway ballast mixed with crumb rubber considering size and percentage of crumb rubber as well as aggregate gradation. *Construction and Building Materials*, 241, 118133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118133>

6. Koohmishi, M. (2022). Stiffness and damping properties of railway ballast aggregate considering influence of degradation of aggregate and incorporation of crumb rubber. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107177. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107177>
7. Kraśkiewicz, K. (2020). Study on possible application of rubber granulate from the recycled tires as an elastic cover of prototype rail dampers, with a focus on their operational durability. *Materials*, 14(19), 5711. <https://doi.org/10.3390/ma14195711>
8. Kraśkiewicz, K. (2021). Resistance to severe environmental conditions of prototypical recyclingbased under ballast mats (UBMs) used as vibration isolators in the ballasted track systems. *Construction and Building Materials*, 319, 126075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126075>
9. Kraśkiewicz, K. (2023). Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats (UBMs) produced from deconstructed tires – the effect of mat thickness. *Construction and Building Materials*, 369, 130559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130559>
10. Kuziev, I. O. (2023). Hibrydni konstruktsii balok na transporti iz zastosuvanniam metalu [Hybrid beam structures in transport using metal]. *Zbirnyk naukovykh prats*, 7(38), 237–243. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.237243](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.237243) [in Ukrainian].
11. Sarkar, A., Barman, R., & Bhowmik, D. (2021). Estimation and prediction of screening efficiency of Sand Crumb Rubber (SCR) mix infill trench. *International Journal of Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1964784>
12. Sarkar, A., Barman, R., & Bhowmik, D. (2021). Numerical investigation on vibration screening using geofoam and sandcrumb rubber mixture infilled trench. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, 84. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00329-z>
13. Volkov, V., Taran, I., Volkova, T., Pavlenko, O., & Berezhnaja, N. (2020). Determining the efficient management system for a specialized transport enterprise. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020(6), 185–191.
14. Xiao, X., Cai, D., Lou, L., Shi, Y., & Xiao, F. (2021). Application of asphaltbased materials in railway systems: A review. *Construction and Building Materials*, 304, 124630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124630>
15. Yu, W., Cai, D., Lou, L., Shi, Y., & Xiao, F. (2021). Investigation on the physical, mechanical and microstructural properties of epoxy polymer matrix with crumb rubber and short fibres for composite railway sleepers. *Construction and Building Materials*, 295, 123700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123700>