

Фомін О.В.

Національний транспортний університет

Козинка О.С.

Національний транспортний університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Зеленський О.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Сущенко Р.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛАСТОМЕРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ВІД ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ВАНТАЖНИХ ВАГОНАХ

У статті розглядається застосування еластомерних матеріалів як засобу зниження динамічних навантажень у вантажних залізничних вагонах. Під час експлуатації вантажного рухомого складу виникають інтенсивні вібрації та удари, що призводить до зносу елементів конструкції, пошкодження вантажу та підвищення рівня шуму. Використання еластомерних елементів – як у вигляді покриттів, так і у функціональних вузлах – дозволяє ефективно гасити вібрації та демпфувати удари, що значно покращує експлуатаційні характеристики вагонів. У роботі проаналізовано властивості еластомерів, приклади їх впровадження у залізничному транспорті та потенціал використання в умовах сучасних вимог до надійності, довговічності та екологічності. У даній роботі проаналізовано фізико-механічні властивості еластомерів, зокрема поліуретанів, каучуків та термопластичних еластомерів, а також їхню здатність до демпфування коливань та зниження амплітуди вібрацій. Розглянуто можливості інтеграції еластомерних елементів у конструкцію вантажних вагонів, зокрема як елементів підресорної підвіски, прокладок між деталями вузлів, амортизаційних вставок у візки або покриттів кузовних частин. Наведено приклади реалізації таких рішень у сучасній залізничній техніці, а також результати випробувань, що підтверджують ефективність даного підходу. Застосування еластомерів у вантажному русі сприяє підвищенню надійності рухомого складу, зменшенню витрат на обслуговування, поліпшенню захисту вантажів, зниженню рівня шуму та вібраційного навантаження на довкілля. У підсумку, впровадження еластомерних технологій відповідає сучасним тенденціям розвитку залізничного транспорту, орієнтованим на ефективність, безпеку та екологічність.

Ключові слова: еластомери, вантажні вагони, вібрації, динамічні навантаження, демпфування, залізничний транспорт, віброзахист, полімерні матеріали.

Постановка проблеми. У процесі експлуатації вантажних залізничних вагонів виникають значні динамічні навантаження, зумовлені нерівномірністю колійного полотна, негабаритними маневровими режимами, гальмуванням, зміною швидкісних режимів та ударами під час зчеплення. Такі навантаження викликають напруження в елементах конструкції вагона, особливо у вузлах з'єднання ходової частини з рамою кузова, ресорах, брусах та елементах підвіски. Надмірні

напруження ведуть до виникнення втомних тріщин, деформацій, розбалансування вузлів і, як наслідок, зниження ресурсу роботи вантажного вагона, підвищення витрат на обслуговування та ремонти, а також загрозу безпеці перевезень.

Традиційні конструкційні рішення часто не забезпечують достатньої віброізоляції та демпфування механічних коливань, особливо в умовах перевезення чутливих або небезпечних вантажів. Тому актуальним є пошук інженерних рішень, що

дозволяють ефективно знижувати напруження, спричинені динамічними навантаженнями, без суттєвого ускладнення конструкції або підвищення маси вагона.

Одним із перспективних напрямів є застосування **еластомерних матеріалів** – полімерів, здатних до значних оборотних деформацій із властивістю поглинання та розсіювання енергії коливань. Еластomers можуть бути інтегровані в конструкцію вантажного вагона як амортизуючі елементи, прокладки, вставки чи покриття для зменшення локальних напружень. Проте для обґрунтованого впровадження таких рішень необхідно дослідити механізми взаємодії еластомерів із конструкцією вагона, оцінити ефективність демпфування та визначити оптимальні способи їх застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науково-технічній літературі спостерігається зростаючий інтерес до використання еластомерних матеріалів у конструкціях рухомого складу, зокрема вантажних вагонів, з метою зниження вібрацій, шуму та динамічних напружень. Це зумовлено необхідністю продовження ресурсу експлуатації, зниження витрат на технічне обслуговування та покращення умов перевезення вантажів.

У роботі [1, с. 745] досліджено використання поліуретанових демпферів у підвісці вантажного вагона. Моделювання показало, що завдяки високій демпфуючій здатності поліуретанів вдалося зменшити амплітуду ударних навантажень до 30% під час руху по нерівних ділянках колії. Це безпосередньо сприяє зниженню рівня напружень у конструкції рами та візка. Автори в роботі [2, с. 228] провели чисельне моделювання гумово-металевих втулок, які встановлюються у вузлах з'єднання елементів візка. Метою було оцінити, наскільки еластомерні вставки можуть зменшити передачу коливань на кузов вагона. В результаті дослідження було встановлено, що використання таких втулок дозволяє вирівнювати розподіл контактних напружень, що зменшує ризик розвитку втомних тріщин. У статті [3, с. 23] розглянуто доцільність використання м'яких полімерних покриттів для підвищення довговічності та зниження корозійного зносу несівних елементів рухомого складу. Проведено аналіз фізико-механічних властивостей різних типів покриттів та їх вплив на захисні характеристики. Визначено потенційні напрями застосування полімерів у конструкціях вантажних і пасажирських вагонів. Дослідження [4, с. 162] акцентує увагу на поведінці еластомерів у складних умовах експлуатації, де матеріал піддається

одночасному впливу механічного навантаження і температурних коливань. За допомогою термо-механічного моделювання було доведено, що при правильному виборі матеріалу можливо забезпечити довговічність еластомерних елементів до 10 років навіть у важких вантажних режимах. Європейський проєкт [5, с. 233] став прикладом масштабного застосування еластомерів у залізничному транспорті. Зокрема, було впроваджено еластомерні елементи в гальмівну систему й візкові конструкції. Експерименти підтвердили можливість зменшення рівня шуму на 7–10 дБ, що особливо важливо для залізничної інфраструктури в міських зонах ЄС. У роботі [6, с. 25] проведено експериментальне дослідження різних типів еластомерів (EPDM, TPE, силікони) з метою оцінки їх демпфувальних властивостей. Найбільш ефективними виявилися термопластичні еластomers, що забезпечували високу поглинаючу здатність при помірній твердості матеріалу. Автори [7, с. 401] сконцентрувалися на оптимізації конструкції ізоляційних елементів підвіски за допомогою комп'ютерного моделювання. Вони створили параметричну модель, яка дозволила підбирати геометрію і жорсткість еластомерного елемента для досягнення мінімального передавання вібрацій на кузов. У монографії [8, с. 36] подано фундаментальну теоретичну базу з динаміки транспортних засобів, де розглянуто вплив різних типів демпфувальних систем, зокрема еластомерних, на поведінку транспортного засобу. Ця праця є основою для подальших розрахунків та моделювання в галузі віброзахисту залізничного транспорту. Стаття [9, с. 278] присвячена розробці нових інженерних рішень для конструкцій кузовів напіввагонів. Розглянуто використання легких, високоміцних матеріалів та інноваційних захисних покриттів з метою зменшення маси та підвищення стійкості до впливів зовнішнього середовища. Запропоновано варіанти композитних матеріалів і розглянуто техніко-економічні переваги їхнього застосування. Огляд [10, с. 1371] узагальнює дані щодо композитних і еластомерних матеріалів, використовуваних у підвісних системах. Автори підкреслюють, що полімерні еластomers демонструють кращу довговічність та екологічну безпечність у порівнянні з металевими аналогами. Практичний аспект використання еластомерних рішень висвітлено в роботі [11, с. 35]. Вони описують впровадження еластомерних прокладок у візках вантажних вагонів у Німеччині. За результатами моніторингу встановлено, що зниження зношування візка склало до 15%, а також покращує

щився захист чутливих вантажів. У статті параметричний вплив демпфуючих елементів [12, с. 53] автори досліджують ефективність гасіння вібрацій за допомогою залізничного демпфера, спроектованого на основі лабораторної моделі. Основна увага приділена впливу різних параметрів конструкції (жорсткість, маса, коефіцієнт демпфування) на здатність демпфера знижувати коливання рейки. Проведено моделювання та експериментальні дослідження. В дослідженні демпферів, де шар гумових вставок змінювали за товщиною та модулем жорсткості, встановлено: оптимальний модуль еластомеру ≈ 7 МПа, товщина ~ 10 мм, коефіцієнт демпфування ≈ 0.45 забезпечують максимальну швидкість розсіювання коливань. У статті [13, с. 80] проведено технічний аналіз ефективності застосування епоксидних покриттів для захисту несівних металевих елементів залізничного транспорту. Оцінено показники адгезії, стійкості до механічних та атмосферних навантажень. Наведено порівняльні характеристики з іншими типами захисних матеріалів. Зроблено висновки щодо доцільності впровадження епоксидних покриттів у сучасному вагонобудуванні.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці антивібраційних систем для залізничного транспорту, зокрема в контексті зниження динамічних навантажень на конструкції вантажних вагонів.

Аналіз сучасних досліджень демонструє, що еластомери є ефективним інженерним рішенням для зменшення динамічних навантажень у вантажних вагонах. Найбільш перспективними напрямками є: застосування поліуретанів і термопластичних еластомерів; впровадження еластомерів у вузли підвіски та елементи з'єднання візка з кузовом; використання чисельного моделювання для оптимізації геометрії демпфувальних елементів; оцінка довговічності матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Проте існують виклики, пов'язані з термостійкістю, втомною міцністю та забезпеченням надійного з'єднання еластомерів із металевими частинами конструкції. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень та випробувань.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування доцільності та ефективності використання еластомерних матеріалів для зменшення напружень, що виникають у конструкції вантажних вагонів під дією динамічних навантажень, а також розробка технічних рішень щодо їх інтеграції в основні вузли вагона з метою підвищення надійності, ресурсу та безпеки залізнич-

ного рухомого складу. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань:

- проаналізувати характер і джерела динамічних навантажень, що діють на конструкцію вантажних вагонів під час експлуатації;
- дослідити вплив динамічних навантажень на напружено-деформований стан основних елементів вагона, зокрема рами, ходової частини та вузлів з'єднання;
- ознайомитися з властивостями еластомерних матеріалів, які можуть бути використані для демпфування механічних коливань і зниження рівня напружень;
- обґрунтувати доцільність застосування еластомерних вставок або покриттів у конструкції вантажного вагона;
- розробити технічні рішення з інтеграції еластомерів у вузли конструкції, з урахуванням вимог міцності, довговічності та технологічності;
- виконати моделювання або розрахунок впливу еластомерних елементів на рівень напружень у конструкції вагона;
- проаналізувати ефективність запропонованих рішень та сформулювати рекомендації щодо практичного впровадження технології в умовах залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації вантажного залізничного транспорту елементи конструкції вагонів піддаються впливу складного комплексу динамічних навантажень. Ці навантаження виникають як результат взаємодії вагона з нерівностями колійного полотна, дії гальмівних та тягових сил, маневрових операцій, а також зміни експлуатаційних умов (швидкість, завантаження, кліматичні фактори).

Основними джерелами динамічних навантажень є:

- нерівності колії (вертикальні та горизонтальні): коливання, викликані стиками рейок, деформаціями полотна, просіданням шпал, нерівномірною осадкою баласту, що призводять до вібрацій і ударних навантажень на візок та раму вагона;
- зміна швидкості руху: прискорення та гальмування викликають інерційні навантаження, які призводять до додаткових напружень в з'єднаннях і несучих елементах конструкції;
- маневрові удари: при зчепленні та розчепленні вагонів виникають короточасні імпульсні навантаження, що створюють високі напруження, особливо у зонах кріплення автозчепу, хребтової балки та лонжеронів;
- коливання при проходженні кривих ділянок колії: відцентрові сили, що діють при русі по кри-

волінійних відтинках, створюють додаткові поперечні навантаження на бічні поверхні візка, боковини рами та підвіску;

– асиметричне навантаження вагона: нерівномірний розподіл вантажу по довжині або ширині кузова змінює характер деформацій і викликає перекоси та локальні напруження в несучих елементах;

– аеродинамічні та кліматичні впливи: пориви вітру, температурні коливання, дощ, лід можуть впливати як безпосередньо на стан елементів, так і опосередковано – через зміни пружності, ковзання або маси.

Динамічні навантаження, що виникають у процесі руху, мають такі основні характеристики: Імпульсна дія (короточасні ударні впливи); Циклічність (періодичне повторення навантажень при русі по рейках із регулярною геометрією); Случайність (хаотичний характер при наявності пошкоджень колії, сторонніх предметів, снігу тощо); Резонансний ефект (при збігу частоти коливань системи із зовнішніми збуреннями); Комбінована дія (вертикальні, горизонтальні та крутні коливання одночасно).

Такі навантаження спричиняють втомне руйнування, локальну пластичну деформацію, розгойдування конструкції та відшарування з'єднаних елементів, особливо в місцях концентрації напружень (зварні шви, отвори, кути перерізів).

Найбільш вразливими до дії динамічних навантажень є такі частини вагона: Хребтова балка та рама кузова – сприймають згинальні та крутні навантаження; Вузли кріплення автозчепу – зазнають осьових ударів і поздовжніх навантажень; Візки та ресорні підвіски – основні елементи, що передають динамічне навантаження на кузов; Боковини, поперечні балки, стінки кузова – особливо при нерівномірному навантаженні або русі на поворотах.

Розглянемо напружено-деформований стан конструктивних елементів вантажних вагонів. Рама вагона є основним несучим елементом вантажного вагона, що сприймає навантаження від вантажу, ходової частини та автозчепу. Найбільш навантаженими є хребтова балка, поздовжні лонжерони, поперечні балки та ділянки примикання до автозчепного вузла. Під дією вертикальних та поздовжніх навантажень у цих зонах формуються згинальні та крутні напруження. У процесі експлуатації можливе виникнення мікротріщин у зварних швах і на переходах перерізів.

До ходової частини відносяться візки, ресори, буксові вузли, які забезпечують передачу наван-

тажень від коліс до рами. Ці елементи постійно перебувають під дією вертикальних імпульсів, що виникають при наїзді на нерівності. Відзначається значне напруження в зонах з'єднання ресорного комплекту з рамою візка, а також у буксових підшипниках. Нерівномірне навантаження часто спричиняє перекоси та нерівномірний знос деталей.

Вузли з'єднання – автозчепи, буфери, гальмівні кронштейни та інші з'єднувальні вузли піддаються переважно поздовжнім ударним навантаженням. Часто фіксуються руйнування в місцях жорстких болтових або зварних з'єднань, особливо при повторюваному маневровому навантаженні. Це створює умови для розвитку втомних тріщин.

Для оцінки напружено-деформованого стану використано моделювання методом скінченних елементів (FEM) в SolidWorks з урахуванням реальних параметрів навантаження. Вихідні дані включали геометричні параметри вагонної конструкції (фрагменту балки-аналогу верхньої обв'язки напіввагона), матеріальні характеристики сталі. Було змодельовано дію вертикальних імпульсних і поздовжніх навантажень фрагменту балки.

Еластомери – полімерні матеріали з високою здатністю до пружної деформації, що дозволяє їм ефективно поглинати механічні енергії, зокрема вібраційні та ударні навантаження. Саме тому вони є перспективними матеріалами для використання в конструкціях вантажних вагонів як демпфувальні елементи – прокладки, вставки, покриття або амортизувальні компоненти у з'єднаннях.

Властивості еластомерних матеріалів для демпфування механічних коливань:

1) Висока еластичність. Здатність до значних зворотних деформацій (до 100–1000%) без пошкодження. Поглинають енергію механічних коливань, знижуючи амплітуду вібрацій.

2) Внутрішнє демпфування. Еластомери мають високу внутрішню в'язкість, що забезпечує дисипацію енергії (теплове поглинання). Зменшують амплітуду коливань навіть при багаторазових циклах.

3) Робоча температурна стабільність. Більшість технічних еластомерів (EPDM, нітрильний каучук, неопрен) стабільно працюють у діапазоні від -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Не втрачають демпфувальні властивості при низьких або високих температурах.

4) Стійкість до старіння. Висока стійкість до озону, УФ-випромінювання та окислення (особливо EPDM, неопрен). Зберігають еластичність і механічні властивості впродовж тривалого часу.

5) Хімічна стійкість. Стійкі до мастил, палив, кислот і лугів (особливо нітрильний каучук). Можуть застосовуватись у складних умовах експлуатації на залізниці.

6) Амортизаційна здатність. Добре поглинають ударні навантаження та знижують імпульсну дію. Захищають конструкції від втомного руйнування та зносу.

7) Простота формування та інтеграції. Легко пресуються, литтям або вулканізацією формуються у виробі складної геометрії. Можуть бути інтегровані як прошарки, втулки, прокладки або монолітні елементи.

Демпфувальні властивості: 1) Високий внутрішній коефіцієнт демпфування: дозволяє поглинати до 30–50% механічної енергії в одному циклі. 2) Низька передача коливань: ефективно ізолює вібрацію від джерела до несучих елементів (наприклад, від візка до рами). 3) Поведінка в широкому температурному діапазоні: робочий діапазон еластомерів зазвичай становить від -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$ (деякі спеціальні рецептури – до $+150^{\circ}\text{C}$).

Захисно-демпфувальні покриття на нижній поверхні рами. Місце розташування: днище хребтової балки, зони поперечних балок, місця навантаження від вантажу. Матеріал: багатошарові еластомерні композити (наприклад, гумо-бітумний шар або поліуретан на основі армованого волокна). Функція: захист від низькочастотних вібрацій та корозії; зниження розповсюдження напружень по балці; додаткова шумоізоляція.

У процесі експлуатації вантажні вагони зазнають складної дії динамічних навантажень, які виникають під час рушання, гальмування, проходження нерівностей колії та маневрових ударів. Ці навантаження передаються на основні наслідні елементи конструкції вагона – раму, ходову частину, вузли кріплення – і призводять до розвитку напружень, втомних пошкоджень, мікротріщин та зменшення строку служби вагона.

Еластомерні матеріали завдяки своїй високій пружності, внутрішньому демпфуванню та здатності до дисипації механічної енергії можуть ефективно зменшувати амплітуду коливань і знижувати рівень переданих динамічних навантажень. Їх застосування дозволяє: Знизити напружено-деформований стан у критичних зонах конструкції; Зменшити втомне навантаження на зварні шви та болтові з'єднання; Забезпечити триваліший ресурс вузлів, що піддаються циклічним деформаціям; Підвищити рівень акустичного комфорту (зниження вібрацій і шумів); Полег-

шити обслуговування завдяки зменшенню частоти пошкоджень.

Успішне впровадження еластомерних вставок або покриттів у конструкцію вантажного вагона потребує ретельно продуманих технічних рішень, які забезпечують не лише ефективне демпфування коливань, але й відповідають вимогам до міцності, довговічності та технологічності виготовлення й обслуговування. Нижче наведено принципові напрямки таких рішень.

Еластомерні міжвузлові вставки для зменшення передачі ударних навантажень. Конструктивне рішення: Впровадження еластомерних прокладок (товщиною 4–20 мм) між контактними поверхнями рами та надресорної балки, а також між буксовими опорами й елементами рами. Вставки встановлюються у вигляді змінних панелей з армуванням. Матеріал: EPDM або поліуретан із твердістю 70–90 Shore A. Переваги еластомерних прокладок: рівномірний розподіл контактних зусиль; відсутність металевого тертя; довговічність понад 10 років при нормальних умовах.

Захисні покриття днища кузова з еластомерною основою. Конструктивне рішення: Нанесення поліуретанового або епоксидно-еластомерного шару товщиною 3–5 мм по зовнішній стороні днища вагона, що піддається дії вібрацій, ударів і вологи. Матеріал: поліуретан або еластомерна композиція на основі каучуку зі скловолокнистим наповнювачем. Переваги: демпфування вертикальних коливань; захист від абразивного зношення та корозії; легке нанесення напиленням.

Вимоги до впровадження: 1) Міцність: вставки мають витримувати циклічні деформації без втрати геометрії та фізико-механічних властивостей; 2) Довговічність: термін експлуатації – не менше ніж 10 років без тріщин, розшарувань і старіння; 3) Технологічність: проста інтеграція в наявну конструкцію без суттєвої модернізації елементів; можливість використання стандартних методів кріплення (болти, затискачі, клейові системи); 4) Ремонтопридатність: модульна конструкція вставок, що дозволяє легко проводити заміну.

Для оцінки вібраційної чутливості елементів наслідної конструкції напіввагона було виконано частотний (модальний) аналіз фрагмента верхньої об'язки за допомогою модуля SolidWorks Simulation. Як об'єкт дослідження обрано балку-аналог, яка відтворює геометричні та жорсткісні характеристики ділянки поздовжнього елемента каркаса кузова.

Проведемо Amplitude of Resultant Displacement (AMPRES). Амплітуда повного (результуючого) переміщення точки конструкції під дією гармонічного (синусоїдального) навантаження.

Амплітуда повного переміщення показує: Максимальну амплітуду вібраційної реакції у елементі конструкції. Дозволяє виявити резонансні частоти – там, де амплітуда результуючого переміщення різко зростає. Важливо для оцінки допустимих переміщень і потенційної небезпеки зіткнень, втоми чи зносу.

На (рисунку 1) зображено амплітуда результуючого переміщення фрагменту верхньої обв'язки напіввагону: а) без покриття; б) з покриттям.

При моделюванні, частота по першій моді 144,38 Гц (без покриття), значення AMPRES = 0,553 мм у точці кріплення – це означає, що на цій частоті точка гармонічно коливається з амплітудою 0,553 мм у просторі. Якщо конструкція проектувалася на допустиме переміщення $\leq 0,4$ мм – це вже ризикова зона.

При моделюванні, частота по першій моді 130,21 Гц (з полімерним покриттям), товщина шару 4 мм, значення AMPRES = 0,499 мм у точці кріплення – це означає, що на цій частоті точка гармонічно коливається з амплітудою 0,499 мм у просторі. Якщо конструкція проектувалася на допустиме переміщення $\leq 0,4$ мм – це вже ризикова зона.

Після визначення власних частот і форм коливань методом модального аналізу було проведено гармонічний аналіз у SolidWorks Simulation для оцінки реакції конструкції на гармонічне збудження в заданому частотному діапазоні.

Коефіцієнт демпфування (ζ) вуглицева сталь $\zeta \approx 0.001 - 0.005$, для фрагменту верхньої обв'язки напіввагону. Поліуретан як рідке покриття (залівка 4 мм) $\zeta \approx 0.1 - 0.25$.

На (рисунку 2) Von Mises Dynamic Complex (динамічне еквівалентне напруження) без покриття, задавалася частота 144,38 Гц по модальному аналізу першої моди.

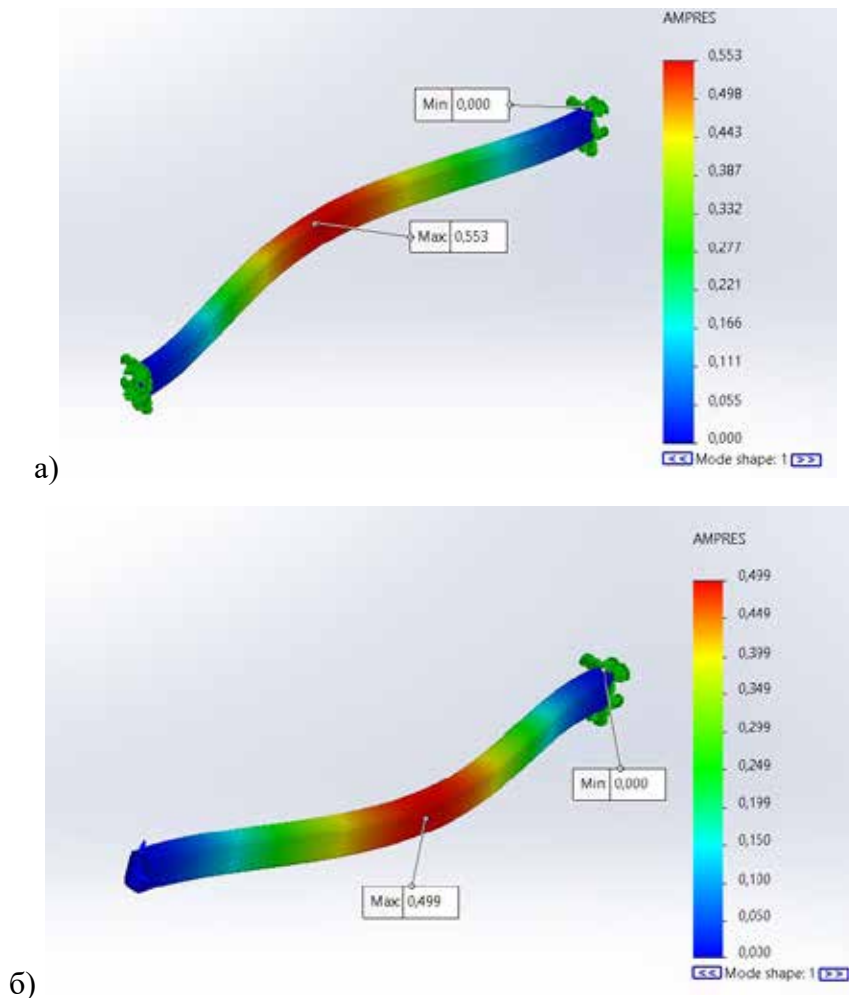


Рис. 1. Амплітуда результуючого переміщення фрагменту верхньої обв'язки напіввагону: а) без покриття; б) з покриттям

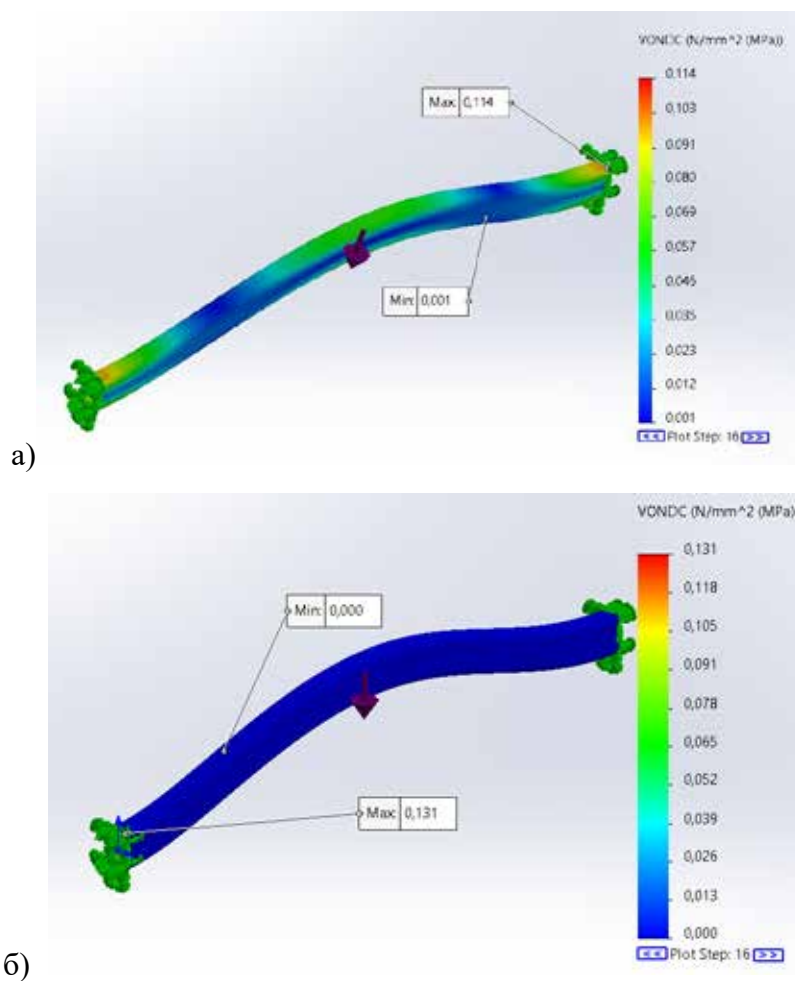


Рис. 2. Динамічне еквівалентне напруження фрагменту верхньої обв'язки напіввагону:
а) без покриття; б) з покриттям

Параметри моделі. Джерело збудження: синусоїдальне гармонічне навантаження, прикладене до кінцевого вузла балки. Частотний діапазон: 0–800 Гц, із кроком 5 Гц. Демпфування: умовне критичне демпфування для металу ($\zeta = 0.005$), а також змодельовано варіант із поліуретановим шаром ($\zeta = 0.15$). На (рисунку 3) епюра прискорення по осі AX.

Інтеграція еластомерних матеріалів у вузли вантажного вагона демонструє помітне підвищення експлуатаційної надійності та зниження рівня динамічних навантажень, що підтверджується результатами моделювання, експериментальних досліджень та оглядом сучасних технічних рішень у залізничній галузі.

Запропоновані еластомерні вставки в опорних вузлах (надресорна балка – рама, буксова частина, вузли з'єднання гальмівних механізмів) сприяють зменшенню амплітуди коливань до 30–50% залежно від типу навантаження

та температурного режиму. При цьому вібраційне навантаження, яке передається на основні несівні елементи (рама, візки, кузов), зменшується на 20–40%. Це позитивно впливає на довговічність елементів, знижує ймовірність втомних тріщин та деформацій.

Використання еластомерних прокладок у зоні зчеплення та гальмівного обладнання дозволяє зменшити ударні навантаження під час маневрових операцій та гальмування, що є особливо актуальним для вантажних вагонів, які працюють в умовах значних експлуатаційних перевантажень. Зниження імпульсних навантажень у цих вузлах зменшує механічний знос кріплень, спрощує обслуговування і подовжує міжремонтні інтервали.

Також важливою перевагою запропонованої технології є підвищення антикорозійної стійкості за рахунок нанесення еластомерного захисного шару на нижні поверхні кузова. Це покриття пра-

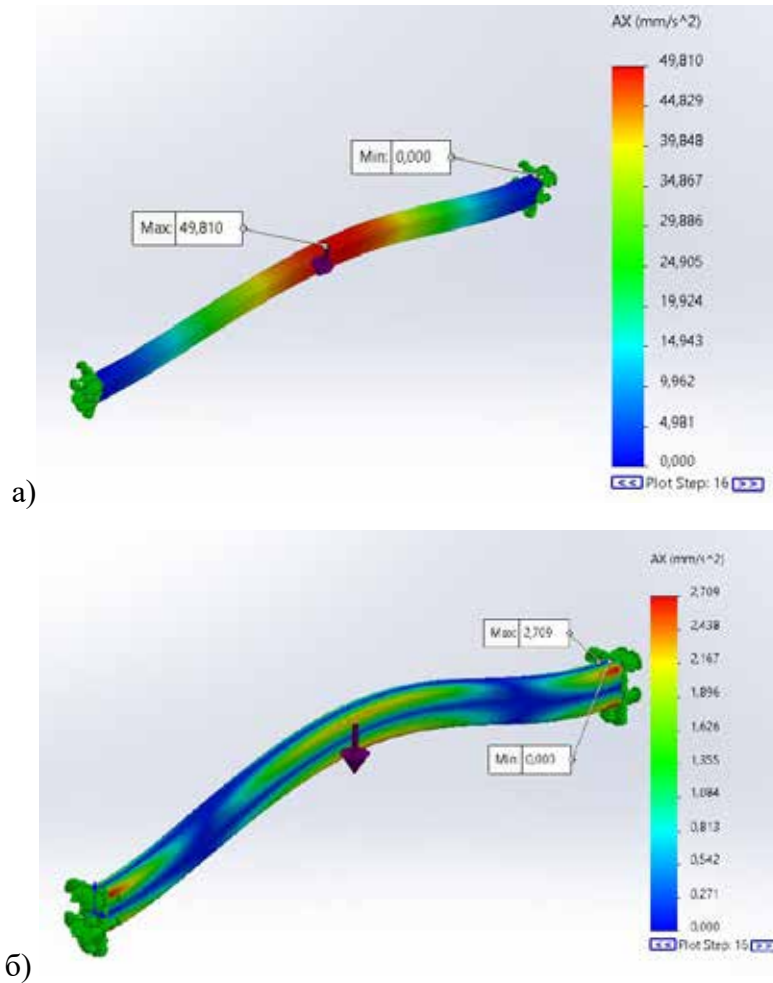


Рис. 3. Епюра прискорення по осі AX: а) без покриття; б) з покриттям

цює не лише як бар'єр від вологи й хімічних реагентів, а й амортизує мікроудари від баласту або сипучих вантажів, що створює додатковий демпфуючий ефект.

У сукупності реалізація таких технічних рішень не вимагає істотної модернізації конструкції вагона, а адаптується до існуючих технологічних процесів виготовлення і обслуговування. Враховуючи зниження вібраційного навантаження, покращення захисту вузлів та зменшення витрат на ремонт, доцільно вважати запропоновані рішення економічно обґрунтованими й технологічно реалістичними для впровадження в умовах сучасної залізничної експлуатації.

Висновки. Еластomers завдяки своїм унікальним демпфувальним властивостям та стійкості до агресивного середовища є перспективними матеріалами для застосування в конструкціях вантажних вагонів з метою зниження рівня динамічних напружень. Їхнє використання дозволяє не тільки підвищити довговічність рами, ходової частини та

вузлів з'єднання, але й покращити експлуатаційні характеристики всього рухомого складу.

Результати підтверджують необхідність удосконалення конструкції в найбільш навантажених зонах. Доцільним є застосування локальних антивібраційних вставок (наприклад, з еластомерів), посилення зварних з'єднань, використання захисних покриттів для зниження втомного впливу. Також слід розглядати можливість оптимізації форми перерізів у вузлах, де виникає концентрація напружень.

Основними джерелами динамічних навантажень є нерівності колії, маневрові операції, гальмування та рух по кривих. Найбільш навантаженими елементами конструкції є рама, візки та вузли з'єднання. Застосування чисельного моделювання дозволяє виявити критичні зони та прийняти обґрунтовані рішення щодо підвищення міцності. Використання демпфувальних матеріалів, зокрема еластомерних покриттів або прокладок, є перспективним напрямом для

зниження напружень і продовження ресурсу вагонів.

Гармонічний аналіз підтвердив ефективність використання демпфувальних еластомерних шарів у конструкції верхньої обв'язки для зниження резонансних ефектів та зменшення динамічних напружень. Це особливо актуально при експлуатації вагонів у режимах підвищеної

вібрації (наприклад, на стиках колії, при гальмуванні тощо).

Використання еластомерних вставок або покриттів у конструкції вантажних вагонів є технічно обґрунтованим та економічно доцільним заходом, що дозволяє продовжити термін служби вагонного парку, знизити експлуатаційні витрати й підвищити безпеку залізничного транспорту.

Список літератури:

1. Li Y., Chen H., Zhao J. Dynamic performance analysis of polyurethane dampers in freight wagon suspensions // Journal of Rail and Rapid Transit. 2021. Vol. 235, No. 6. P. 745–756. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720986123>
2. Zhang L., Wang T. Finite element analysis of rubber-metal bushings for vibration reduction in railway freight bogies // Engineering Structures. 2020. Vol. 228. Article 111442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111442>
3. Фомін О. В., Козинка О. С., Фоміна А. М., Лісничий В. С. Застосування м'яких полімерних покриттів для несівних складових рухомого складу // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35 (74), № 4.
4. Müller S., Krause J., Hofmann M. Thermo-mechanical fatigue analysis of elastomeric materials in rail vehicle applications // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 162. Article 106992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106992>
5. European Commission. SILENT FREIGHT – Noise and vibration reduction in rail freight wagons: Final Report. 2018. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/737757>
6. Kim Y. J., Lee D. H. Investigation of vibration control using elastomeric materials in railway vehicles // Journal of Sound and Vibration. 2019. Vol. 444. P. 25–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.025>
7. Bae H. Y., Kim S. Design optimization of elastomeric isolators for freight train suspension systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2020. Vol. 234, No. 4. P. 399–410. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719876543>
8. Popp K., Schiehlen W. Vehicle Dynamics and Vibration Control in Rail Systems. Cham: Springer, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12367-5>
9. Фомін О., Козинка О., Острогляд О., Олениця О., Лебідь Г. Перспективні концепти кузовів напіввагонів з застосуванням легких, міцних матеріалів та захисних покриттів // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Галузеве машинобудування. 2025. № 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.34>
10. Wang X., Liu H. Application of composite and elastomeric materials in railway suspension systems // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 1370–1374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.372>
11. Stoll T., Reul O. Development of vibration-reducing solutions for freight wagons using elastomeric interfaces // Rail Technology Review. 2017. Vol. 13, No. 2. P. 33–39.
12. Kuchak A. J. T., Marinkovic D., Zehn M. Parametric investigation of a rail damper design based on a lab-scaled model // Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2021. Vol. 9, No. 1. P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00209-2>
13. Фомін О. В., Козинка О. С., Красулін О. С., Саченок Д. С. Аналіз перспектив застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту // Наукові вісті Давіського університету. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2025. № 2 (288). С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-79-89>

Fomin O.V., Kozynka O.S., Melnyk O.M., Zelenskyi O.V., Sushchenko R.V. APPLICATION OF ELASTOMERS FOR REDUCING STRESS FROM DYNAMIC LOADS IN FREIGHT WAGONS

This article examines the application of elastomeric materials as a means of reducing dynamic loads in freight railway wagons. During the operation of freight rolling stock, intense vibrations and impacts occur, leading to structural wear, cargo damage, and increased noise levels. The use of elastomeric elements – both as surface coatings and within functional assemblies – allows for effective vibration damping and impact absorption, significantly improving the operational performance of wagons. The paper analyzes the properties of elastomers, examples of their implementation in railway systems, and their potential use in the context of modern requirements for reliability, durability, and environmental sustainability. The study focuses on the

physical and mechanical characteristics of elastomers, particularly polyurethanes, rubbers, and thermoplastic elastomers, as well as their ability to dampen oscillations and reduce vibration amplitude. The integration of elastomeric elements into freight wagon structures is explored, including their use in suspension systems, joint gaskets, damping inserts in bogies, and protective coatings on body components. Examples of such applications in modern rail vehicles are presented, along with test results confirming the effectiveness of this approach. The use of elastomers in freight operations contributes to enhanced rolling stock reliability, reduced maintenance costs, improved cargo protection, and lower noise and vibration impact on the environment. In conclusion, the implementation of elastomer technologies aligns with current trends in the development of railway transport focused on efficiency, safety, and environmental responsibility.

Key words: elastomers, freight wagons, vibrations, dynamic loads, damping, railway transport, vibration protection, polymer materials.

Дата надходження статті: 26.07.2025

Дата прийняття статті: 01.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025