

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І ТРАНСПОРТУ

ПОДОСЬОНОВ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 629.17:629.46

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ П'ЯТНИКОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ
ВАГОНІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ
ВІДНОВЛЕННЯ

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Мурадян Леонтій Абрамович, професор кафедри
Управління та експлуатація рухомого складу
(Дніпровський інститут інформації та транспорту
Українського державного університету науки і
технологій)

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Мартинів Ігор Ернстович, завідувач кафедри Інженерія
вагонів та якість продукції (Український державний
університет залізничного транспорту, м. Харків)

кандидат технічних наук, старший дослідник,
Сафронов Олександр Михайлович, директор
(Державне підприємство "Український науково-
дослідний інститут вагонобудування", м.Кременчук)

Захист відбудеться "27" листопада 2025 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.06 при Дніпровському інституті інформації і транспорту Українського державного університету науки і технологій за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій (49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 266) або на сайті університету <https://nmetau.edu.ua/ua/mscience/i10/p4782> (Наука - Спеціалізована вчена рада Д 08.084.06).

Автореферат розісланий "25" жовтня 2025 року.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



Андрій МУХА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Залізничний транспорт у всьому світі займає вагомую частку ринку послуг, які пов'язані з організацією та забезпеченням перевізного процесу. Тож основним завданням залізниць є підвищення рівня безпеки руху поїздів. Важливу роль у цьому відіграють такі показники, як надійність і безвідмовність рухомого складу, ліній електропередач та зв'язку, пристроїв блокування, а також стан і профіль колії.

Безпека руху поїздів та техніко-економічні показники перевізної роботи в ПАТ «Українська залізниця» значною мірою пов'язані з технічним станом вантажного вагонного господарства. Останнім часом для підвищення цих показників розглядається можливість збільшення міжремонтних пробігів вантажних вагонів без зниження рівня безпеки руху поїздів. Досягнення цієї мети можливе з використанням двох підходів. Перший пов'язаний з розробкою нових зразків вантажного рухомого складу зі збільшеним міжремонтним пробігом та виготовленням окремих нових елементів для вагонів, що експлуатуються, наприклад візків та колісних пар, з підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Другий передбачає застосування нових, більш ефективних технологій ремонту вантажних вагонів, що забезпечують необхідне підвищення міцнісних та зносостійких властивостей наявних експлуатованих зразків для збільшення їхнього міжремонтного пробігу.

Перший варіант, звичайно, є більш необхідним, оскільки понад 80 % експлуатованого вантажного рухомого складу є морально зношеним. Але станом на сьогодні ПАТ «Українська залізниця» не має можливості одночасно замінити декілька тисяч зразків вагонної техніки, що експлуатується і якій продовжено термін служби, оскільки для цього необхідно залучати валютні кредити та лізингові контракти. Тож, з огляду на нинішнє економічне становище України, другий напрямок є більш прийнятним для ПАТ «Українська залізниця», оскільки не потребує залучення значних фінансових вкладень.

Одним із ресурсовизначальних вузлів вантажних вагонів є пара «п'ятник – підп'ятник», від технічного стану якої залежить загальний міжремонтний пробіг вагона. У процесі експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірний знос п'ятникового вузла, що пов'язано з інтенсивністю проходження вагонів кривими колії малого радіуса. Як результат за станом зносу підп'ятник потребує передчасного ремонту. Забезпечення нормативно встановленого та підвищення міжремонтного ресурсу вантажного вагона з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей сполучених поверхонь п'ятникового вузла є актуальним завданням, розв'язання якого повинно ґрунтуватися на застосуванні сучасних, більш ефективних методів забезпечення необхідного рівня зносостійкості й міцності відновлюваних деталей візка вантажного вагона під час ремонту.

Проблемами підвищення надійності та міжремонтного ресурсу рухомого складу займалися такі відомі вчені, як: Абашкін В. В., Андрієвський В. Г., Боднар Б. Є., Борзилов І. Д., Босов А. А., Гайдамака А. В., Горбенко А. П., Горобець В. Л., Девятков В. Ф., Донченко А. В., Іванов С. Г., Капіца М. І., Лосєв А. В., Мартинов І. Е.,

Мямлін С.В., Перов С. В., Устич П. О., Цюренко В. М., Чебаненко В. М., Шавшишвілі А. Д, Шевченко В. В. та ін. Питання підвищення надійності рухомого складу та удосконалення системи його технічного обслуговування та ремонту вивчали Бабанін О. Б., Боднар Б. Є., Босов А. А., Бутько Т. В., Войнов К. М., Головінов Г. Г., Головка В. Ф., Дьомін Ю. В., Капіца М. І., Кельріх М. Б., Мартинов І. Е., Мямлін В. В., Савчук О. М., Тартаковський Е. Д. та інші.

Питання надійності, визначення й подовження ресурсу вузлів залізничного транспорту та впровадження їх в практику досліджували такі вітчизняні й зарубіжні вчені: Броек Д., Бурчак Г. П., Вершинський С. В., Воронін М. М., Данилов В. М., Ірвін Дж., Ісаєв І. П., Кисельов С. М., Колінз Дж., Костенко М. О., Котуранов В. М., Лозбінев В. П., Мапусіта Х., Матвеевічев О. П., Нікольський Є. М., Нікольський Л. М., Нотта Дж., Паріс П., Попов О. О., Райс Дж., Савоськин О. М., Сіраторі М., Мієсі Т., Соколов М. М., Устич П. А., Хеллал К., Хусідов В.Д., Шадур Л. А. та інші видатні вчені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі, визначених у Транспортній стратегії України до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 №1550), а також пов'язана з науково-дослідною роботою, що виконувалася Українським державним університетом науки і технологій, за темами: «Дослідження зразків вагонної техніки у дослідних маршрутах на напрямку Роковата–Ужгород–Кошице» (ДР № 0106U002252), «Розробка інноваційних конструкцій вантажних вагонів з урахуванням зниження енергозатрат в результаті застосування нових технологій зварювання» (№ ДР 0114U0025), у яких автор брав участь як співавтор звітів.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів шляхом використання технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей їхніх сполучених поверхонь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати несправності вузлів вантажних вагонів на залізницях України, розглянути та виконати техніко-економічне обґрунтування вибору методів ремонту та підвищення зносостійкості поверхонь п'ятникових вузлів;
- дослідити експлуатаційні зноси п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів та запропонувати рішення щодо забезпечення рівномірного зносу п'ятникових вузлів;
- виконати теоретичне обґрунтування підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей його сполучених поверхонь;
- дослідити фізико-механічні та триботехнічні властивості відновлених поверхонь п'ятникового вузла;
- виконати експлуатаційні дослідження з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів;
- надати техніко-економічну оцінку запропонованих технологічних рішень.

Об'єкт дослідження – п'ятниковий вузол вантажного вагона як вузол, що обмежує міжремонтний ресурс, у процесі його відновлення і подальшої експлуатації.

Предмет дослідження – технологічні методи підвищення зносостійкості сполучених поверхонь п'ятника і підп'ятника шляхом формування модифікованого поверхневого шару з покращеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у дисертаційній роботі застосовано елементи теорії прийняття рішень, теорія математичної статистики, теорія надійності технічних систем, методи математичного моделювання, експериментальні та аналітичні дослідження, методи системного підходу, аналізу та синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- вперше розроблено математичну модель для кількісної оцінки зносу циліндричної поверхні підп'ятника, яка з урахуванням фізико-механічних і триботехнічних властивостей матеріалів п'ятникового вузла, а також дії сумарних сил у поперечному та поздовжньому напрямках, дозволяє прогнозувати величину зносу залежно від експлуатаційних умов;

- вперше розроблено аналітичні залежності для визначення зазору в сполученні «п'ятник – підп'ятник», які враховують зміну геометричного положення контактних поверхонь унаслідок зносу елементів п'ятникового вузла під час експлуатації вантажного вагона. Запропоновані вирази дозволяють оцінювати зазор з урахуванням як початкових конструктивних параметрів, так і накопичених змін форми поверхонь у процесі роботи;

- удосконалено математичну модель зношування підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, яка, на відміну від існуючих, враховує опорний стан підп'ятника та дозволяє визначати зміну його геометрії на різних етапах експлуатації при заданих початкових умовах;

- набув подальшого розвитку метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок, що, на відміну від існуючих методів наплавлення та встановлення зносостійких елементів, передбачає наварювання на поверхню зносу підп'ятника композиційних стрічок різної товщини з дискретними зносостійкими властивостями. Також запропоновано залежність для визначення концентрації наповнювача композиційної стрічки з урахуванням властивостей матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлу вантажного вагона.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, а також запропоновані вирази, розроблені моделі та підходи можуть бути використані для розв'язання завдання з підвищення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів та безпеки руху поїздів на залізницях України та інших держав на різних етапах експлуатації.

Загальний економічний ефект від застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням зносостійкої композиційної стрічки становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 року.

Отримані результати роботи впроваджені:

- у ремонтних вагонних депо «Батуриньська» та «Нижньодніпровськ-Вузол», для яких надані рекомендації щодо технології відновлення сполучених поверхонь

п'ятникового вузла контактним наварюванням зносостійких композиційних стрічок (акти впровадження відповідно від 14.10.2017; 14.04.2017);

- у навчальному процесі в ході підготовки спеціалістів та магістрів зі спеціальності 273 «Вагони та вагонне господарство» та під час дипломного проєктування (акт впровадження від 06.02.2025).

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені в додатку.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] запропоновано метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок для відновлення поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона; [2] виконано аналіз зносів підп'ятників та запропоновано модель геометрії зносу підп'ятника; [3] побудовано залежність середньої величини зносу підп'ятника для випадків із різними значеннями коефіцієнта використання пробігу; [4] обґрунтовано застосування контактного зварювання при використанні композиційної стрічки із змінними трибомеханічними властивостями; [5] отримано математичну модель розподілу концентрації наповнювача в проєктованій композитній стрічці; [6] запропоновано технічні рішення до удосконалення п'ятникового вузла вантажного вагона; [7] Проведено аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості деталей вантажних вагонів; [8] виконано аналіз пошкоджень вагонів в експлуатації; [9] отримано результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникових вузлів вантажних вагонів; [10] отримано залежність зносу центральної колодки від пробігу, враховуючи силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості взаємодіючих матеріалів; [11] проведено експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла; [12] Запропоновано технологічний процес контактного наварювання п'ятникових вузлів вантажних вагонів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на 76-й, 78-й, 79-й та 81-й міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, УДУНТ, 2016, 2018, 2019, 2021 рр.).

У повному обсязі дисертація була оприлюднена та схвалена на міжкафедральному науковому семінарі в Українському державному університеті науки і технологій (21.04 2025 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, з яких: 7 – наукові статі, надруковані у фахових виданнях, з них 2 – у закордонних виданнях та в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних; 5 публікації апробаційного характеру і тези доповідей, що увійшли до матеріалів міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, та переліку джерел з посиланнями із 123 найменуваннями, одного додатку з акти впровадження. Загальний обсяг дисертації – 172 сторінки, включаючи 20 рисунків, 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність дисертаційної роботи та обґрунтовано актуальність її теми, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі виконано аналіз несправностей вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій. Установлено, що понад 80 % візків вантажних вагонів є морально та фізично зношеними. Під час подальшої експлуатації це спричинить накопичення дефектів у металі з утворенням тріщин, що пов'язано зі зниженням втомної міцності, а також викликатиме раптові відмови вагонів. Зараз експлуатація вагонного парку відбувається в умовах підвищеного використання вантажопідйомності вагона й високих швидкостей руху. У результаті навіть в умовах руху на прямолінійних ділянках сила інерції досягає значень, достатніх для відриву п'ятників від поверхні підп'ятників. Під час обстеження надресорних балок встановлено, що глибина зносу опорних поверхонь підп'ятників, упорних поверхонь зовнішніх і внутрішніх бортів різко зросла. Це пов'язано з підвищенням інтенсивності переміщень п'ятників відносно підп'ятників. Додатковий вплив відбувається в умовах кромкового обпирання п'ятників на підп'ятники і подальшого їхнього відносного повороту під час проходження кривих, що в результаті призводить до максимальної глибини зносу опорної поверхні підп'ятників (інтенсивність такого зносу може становити до 3 мм за рік). У ході експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірне зношення підп'ятника, що пов'язано з інтенсивністю проходження вагонів кривими колії малого радіусу. При цьому виникає нерівномірне збільшення навантажень у візку вантажного вагона (розвантаження одного буксового вузла, надмірне збільшення навантаження на протилежний буксовий вузол тощо).

У результаті виконаного аналізу визначено необхідність у підвищенні міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Тому було розглянуто технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів. У результаті застосування техніко-економічного критерію встановлено, що найпривабливішими технологічними методами є лазерне та плазмове наплавлення. Незважаючи на високу вартість цих методів, вони забезпечують найвище значення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. У нашому дослідженні для ремонту п'ятникових вузлів запропоновано застосування досить простого методу контактного наварювання. Він не потребує додаткового спеціального обладнання, тобто можуть бути використані промислові трансформатори й інші засоби вагоноремонтних підприємств.

У другому розділі виконано дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів. Основні результати наведено в табл. 1.

З даних табл. 1 випливає, що знос підп'ятника дослідних вантажних вагонів відбувається значно інтенсивніше, ніж знос п'ятника. Це підтверджується і результатами обмірів після пробігу вагонів понад 135 тис. км. Найбільший виміряний діаметр підп'ятника становив 307,4 мм, тобто величина зносу за діаметром дорівнює 7,4 мм, або 2,4 %, тоді як найменший виміряний діаметр п'ятників становить 297,2 мм, тобто знос дорівнює 2,8 мм, або 0,9 %.

Прогнозні експлуатаційні пробіги дослідної групи вантажних вагонів, що передбачають появу перших ознак граничного зносу, мають такі значення:

- за підп'ятниками – 174 тис. км;
- за п'ятниками – 320 тис. км.

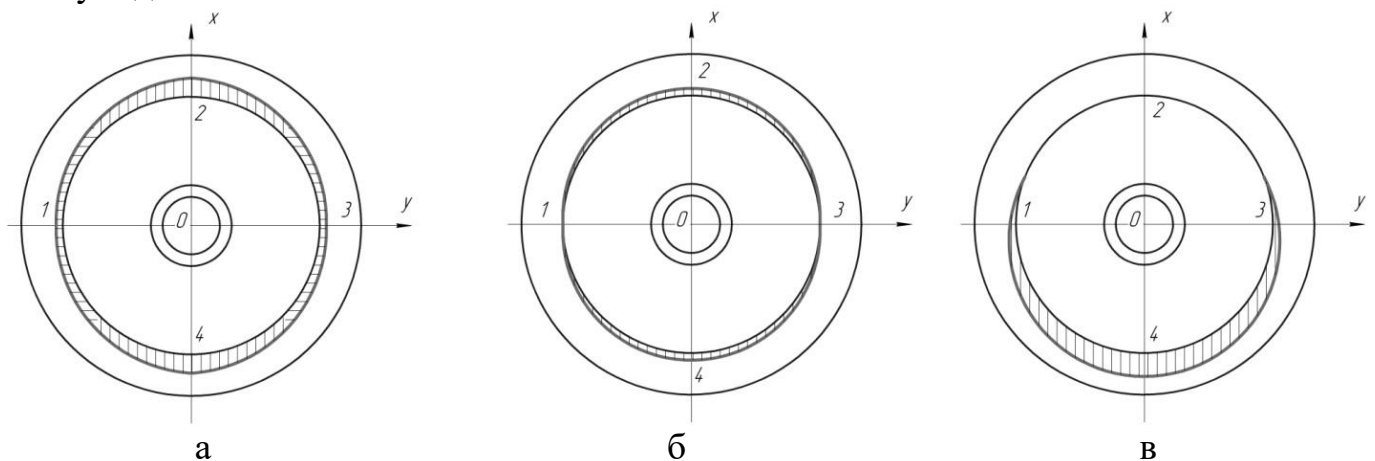
Математичне сподівання граничного значення діаметрів підп'ятників спостерігається за пробігу 230 тис. км, тоді як за діаметром п'ятників – за пробігу 780 тис. км.

Таблиця 1 – Узагальнені дані величин зносів п'ятникових вузлів та прогнозні пробіги вантажних вагонів

Пристрій	Середня інтенсивність зносу, мм/10 ⁴ км	Діаметр після пробігу 135 тис. км, мм	Нормативні граничні значення діаметра, мм	Прогнозні пробіги, тис. км	
				за статистично максимальним чи мінімальним значенням	за математичним сподіванням
Підп'ятник	0,308	307,4	308	174	230
П'ятник	0,076	297,2	294	320	780

Отримані дані вказують на те, що зносостійкість п'ятників достатня для забезпечення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів 300 тис. км, а зносостійкість підп'ятників вантажних вагонів необхідно підвищувати, щоб гарантовано забезпечити ресурс 250...300 тис. км – до першого деповського ремонту.

Дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів дало змогу побудувати епюри зносу підп'ятників, які були характерні для 95 % випадків у дослідній групі вантажних вагонів, а також розподілити їх на підгрупи за характером зносу (рис. 1). При цьому 5 вантажних вагонів не потрапили до жодної з підгруп через відсутність описаної закономірності зносу підп'ятників.



a – знос у всіх напрямках; *б* – знос у двох напрямках; *в* – знос одnobічного характеру

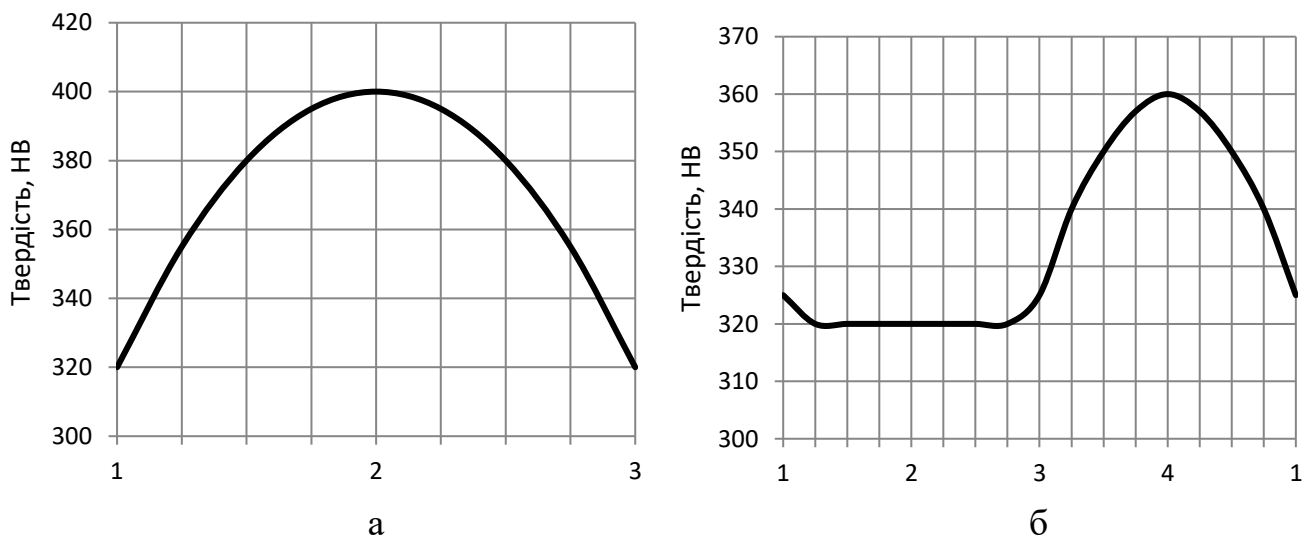
Рисунок 1 – Епюри зносу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів після взаємодії з п'ятником

На рис. 1 можна бачити характерний нерівномірний знос підп'ятників надресорних балок візків дослідної групи вантажних вагонів, який призводить до скорочення міжремонтного ресурсу й постановки вагона на передчасний ремонт.

Епюри зносу п'ятників вантажних вагонів не будувались, оскільки нерівномірний знос не спостерігався.

Результати досліджень експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів підтвердили необхідність підвищення зносостійкості матеріалу підп'ятників із забезпеченням рівномірного розподілу зносу під час експлуатації. Досягши рівномірного зносу підп'ятників, можна буде гарантувати міжремонтний пробіг вантажних вагонів 300 тис. км, до того ж без передчасної постановки на ремонт, і таким чином скоротити фінансові витрати на утримання вантажних вагонів.

Епюри зносу підп'ятників надресорних балок візків дослідної групи вантажних вагонів (див. рис. 1) вказують на необхідність застосування матеріалів з дискретними значеннями міцнісних властивостей за діаметром, що будуть забезпечувати рівномірний знос. Тобто для підвищення міжремонтного ресурсу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів під час виготовлення або ремонту необхідно задати дискретну твердість матеріалу за діаметром, як запропоновано на рис. 2. Причому такий розподіл твердості матеріалу підп'ятника за діаметром під час виготовлення або після ремонту буде відповідати епюрам зносу, наведеним на рис. 1.



а – відповідає епюрам зносу, наведеним на рис. 1, а, б; б – відповідає епюрі зносу, наведеним на рис. 1, в

Рисунок 2 – Розподіл твердості матеріалу за діаметром підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона

Такий розподіл твердості матеріалу підп'ятника за діаметром можна забезпечити за допомогою нинішніх технологій наплавлення та напилювання, але зі значним ускладненням технологічного процесу й збільшенням тривалості самого ремонту. У разі виготовлення підп'ятників з дискретною твердістю також виникне проблема, що пов'язана з ускладненням технологічного процесу.

Наплавлення та напилювання деталей вантажних вагонів належать до групи рідкофазних способів, основним і суттєвим недоліком яких є значний термічний

вплив як на матеріал основи, так і на покриття. Крім того, недоліком можна вважати необхідність подальшої механічної обробки для досягнення нормованих розмірів. З огляду на це, більш перспективними є рідкотвердофазні та твердофазні методи нанесення покриттів, найбільш поширеним з яких є контактне наварювання композиційних матеріалів. Наварювати можна найрізноманітніші матеріали – сталеву чи порошкову стрічку необхідного складу, сталевий чи порошковий дріт, припикати порошкові матеріали. Переваги контактного наварювання полягають у відсутності нагрівання деталей, загартуванні шарів металу основи та покриття безпосередньо під час наварювання, зменшенні витрат присадного матеріалу в 3...4 рази порівняно з дуговим наплавленням, високій продуктивності, економії електроенергії, відсутності вигорання легувальних елементів, можливості регулювання товщини шару, що нагрівається, у межах 0,1...5,5 мм. Цей спосіб не впливає на стан навколишнього середовища та здоров'я оператора. Найбільш широкого використання він набув при відновленні та зміцненні деталей типу «вал». Питання зміцнення контактним наварюванням зносостійких матеріалів на втулки практично не вивчалось.

У третьому розділі виконано теоретичні дослідження міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів, у яких ресурсовизначальним елементом є п'ятниковий вузол.

Для встановлення меж розподілу відновлюваного матеріалу по діаметру підп'ятника було розглянуто втомний процес зношування під час взаємодії з п'ятником і описано геометрію поверхні зносу підп'ятника. При цьому було запропоновано математичну модель для визначення вихідної геометрії поверхні підп'ятника на відповідному життєвому циклі візка вантажного вагона з урахуванням напружено-деформованого стану робочої поверхні.

Координати точок поверхні підп'ятника визначатимуться за виразами:

$$x = f(y, z, c_1) \pm \sqrt{B(y, z, c_1)} ; \quad (1)$$

$$y = f(x, z, c_2) \pm \sqrt{B(x, z, c_2)} ; \quad (2)$$

$$z = f(x, y, c_3) \pm \sqrt{B(x, y, c_3)} , \quad (3)$$

де $f(y, z, c_1)$, $f(x, z, c_2)$, $f(x, y, c_3)$ – функції, що характеризують деформацію стиску в перерізах XOY , XOZ , YOZ підп'ятника, яка відбувається в процесі експлуатації; c_1 , c_2 , c_3 – константи форми поверхні; $\pm \sqrt{B(y, z, c_1)}$, $\pm \sqrt{B(x, z, c_2)}$, $\pm \sqrt{B(x, y, c_3)}$ – девіаторні частини тензора деформацій, що відповідають за поверхневу зміну підп'ятника, а під коренем розміщені функції переміщення точок п'ятника відносно підп'ятника у відповідних напрямках руху.

Варто звернути увагу на відсутність фактора часу в рівняннях (1)–(3), тобто за допомогою цих рівнянь можна описати траєкторію руху точок поверхні підп'ятника. Для визначення зміщення точок з опорної поверхні на зношену поверхню необхідно розкласти дані рівняння в ряд Тейлора й обмежитись похідними першого порядку, оскільки вищий порядок не буде здійснювати суттєвого впливу на напружено-деформований стан підп'ятника.

Визначити зміщення u_x , u_y , u_z навантаженого елемента в процесі руху вздовж осей OX , OY , OZ під час деформації можна на основі таких виразів:

$$u_x = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}} = \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (4)$$

$$u_y = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (5)$$

$$u_z = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (6)$$

Розглянуто взаємодію циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона й вперше отримано залежність величини зносу підп'ятника від пробігу, що враховує силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів сполучених поверхонь у такому вигляді:

$$\delta_{FN} = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) HB_2} \frac{\omega d_2 L}{hd_1 \alpha v} (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi). \quad (7)$$

На основі отриманої залежності на прикладі піввагона моделі 12-7023 встановлено, що середня величина зносу підп'ятника цього піввагона досягає 2 мм за пробігу 80 тис. км (рис. 3).

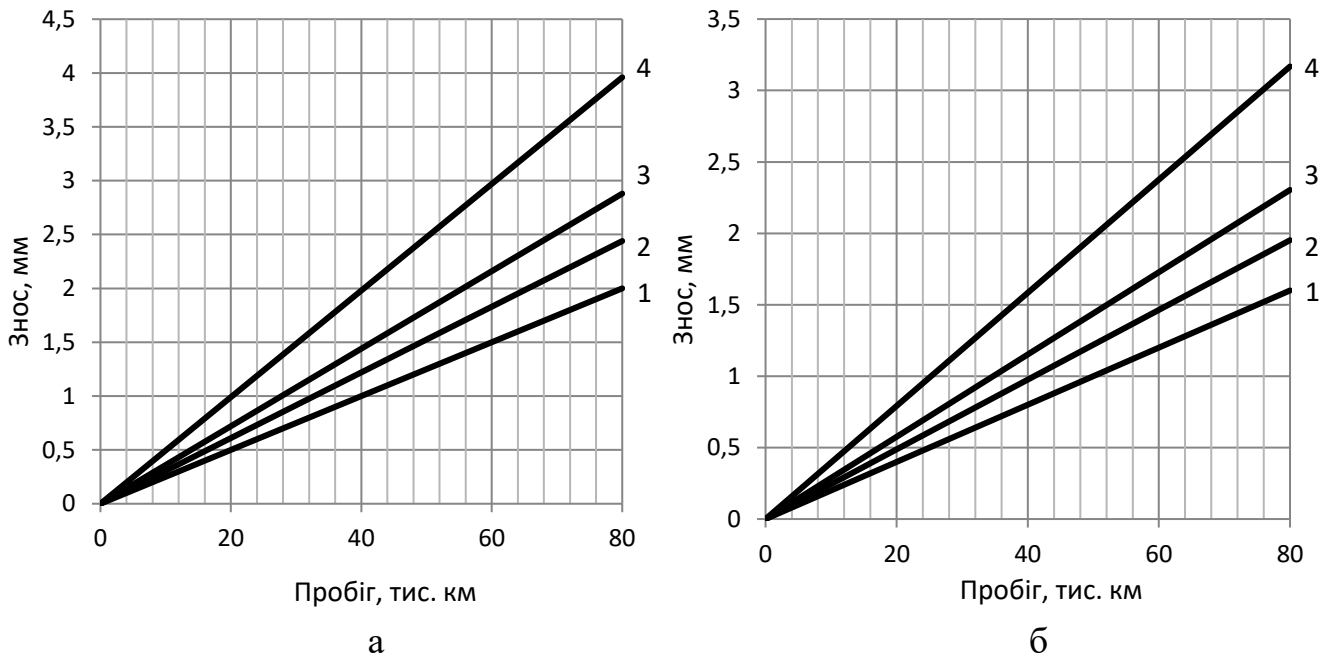


Рисунок 3 – Залежність середньої величини зносу підп'ятника піввагона моделі 12-7023, який рухається у складі поїзда зі швидкістю 80 км/год (а) і 100 км/год (б) для значень коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 1,0

Також у ході розгляду взаємодії елементів пари «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона в момент прикладання зусилля тяги запропоновано вираз для визначення зазору:

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{2} \left(d_2 - (d_2 - d_1) \cos \varphi - \left(d_1^2 - ((d_2 - d_1) \sin \varphi)^2 \right)^{0,5} \right) + f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) HB_2} \frac{\omega d_2 L}{hd_1 \alpha v} (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (8)$$

На основі виразу (8) побудовано залежності зазору між циліндричними поверхнями п'ятника та підп'ятника δ_{Σ} піввагона моделі 12-7023 для точок 1 та 2 (точки 3, 4 будуть симетричними) від пробігу за умови, що початковий (вимірний) рівномірний зазор між поверхнями становить 2 мм. Результати моделювання для швидкості руху поїзда 90 км/год наведено на рис. 4.

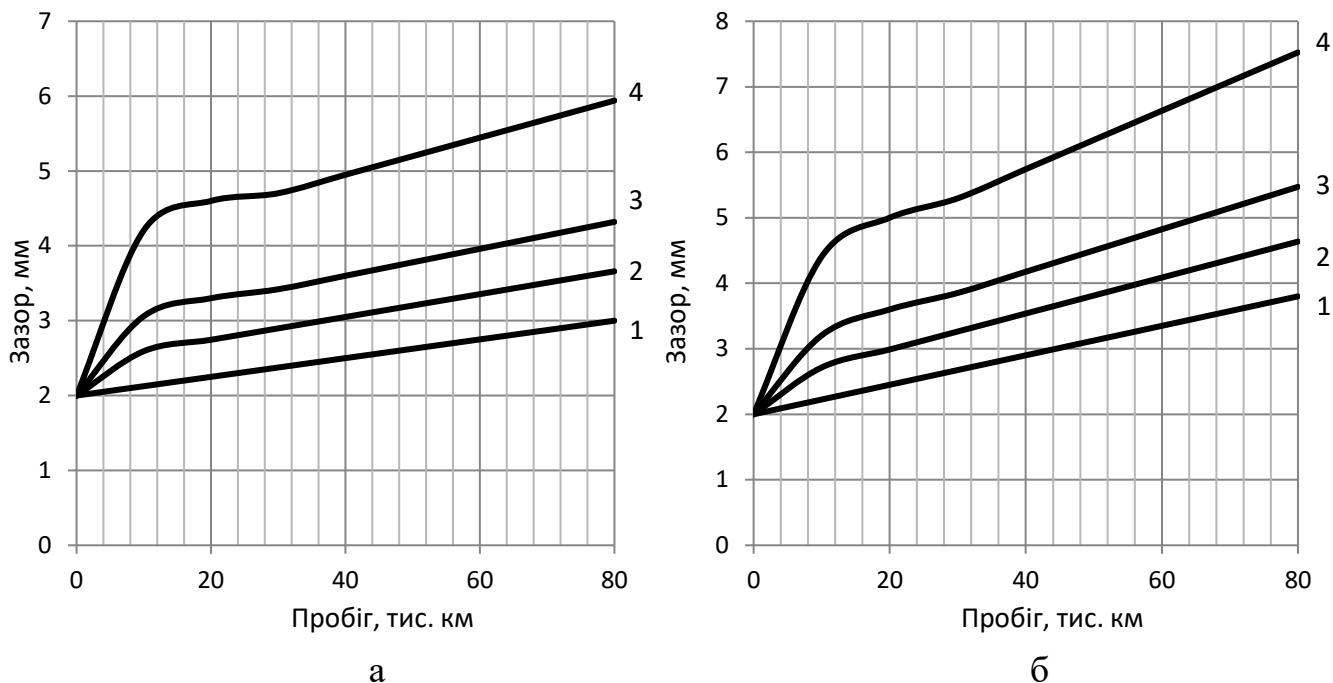


Рисунок 4 – Залежності зазора між циліндричними поверхнями п'ятника та підп'ятника піввагона моделі 12-7023 для точок 1 (а) та 2 (б) від пробігу за швидкості руху поїзда 90 км/год та коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 1,0

Як бачимо з рис. 4, спостерігається нерівномірний зазор в точках 1 та 2 (3 та 4). При цьому різниця зазорів, залежно від пробігу, становить 0,1...1,6 мм, а величина зазора в точці 2 (4) у 1,05...1,27 раза вища порівняно з точкою 1 (3). Також варто звернути увагу на нелінійність зазорів між циліндричними поверхнями пари «п'ятник – підп'ятник» до 20 тис. км пробігу, а понад цей пробіг відбувається вирівнювання й спостерігається лінійна залежність. Наведені залежності підтверджують необхідність застосування матеріалів з дискретною зносостійкістю за твірною циліндричної поверхні підп'ятника.

Також було теоретично обґрунтовано застосування композиційних стрічок для наварювання їх на циліндричну поверхню підп'ятника. Розглянуто раціональний розподіл концентрації наповнювача в композиційній стрічці, у результаті якого отримана залежність, яка характеризує потрібний розподіл концентрації наповнювача композиційної стрічки за довжиною діаметра підп'ятника з урахуванням фізико-механічних властивостей елементів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі, та властивостей композиційної стрічки, за умов забезпечення рівномірного зносу в кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника:

$$C = C_H \exp \left[-f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)HB_1}{(E_M(1 - C_H) + E_H C_H)(1 - \mu_1^2)H_H} \times \frac{H_M + H_H + C_H(H_H + H_M)}{H_M + H_H - C_H(H_H - H_M)} l \right]. \quad (9)$$

Графічно розподіл наповнювача в композиційній стрічці (у відсотковому співвідношенні) за довжиною циліндричної поверхні під'ятника (для характерних точок) наведено на рис. 5. На цьому графіку для спрощення представлення розподілу концентрації за діаметром під'ятника в точках 2 і 4 знак під експонентою у виразі (9) змінюється на протилежний.

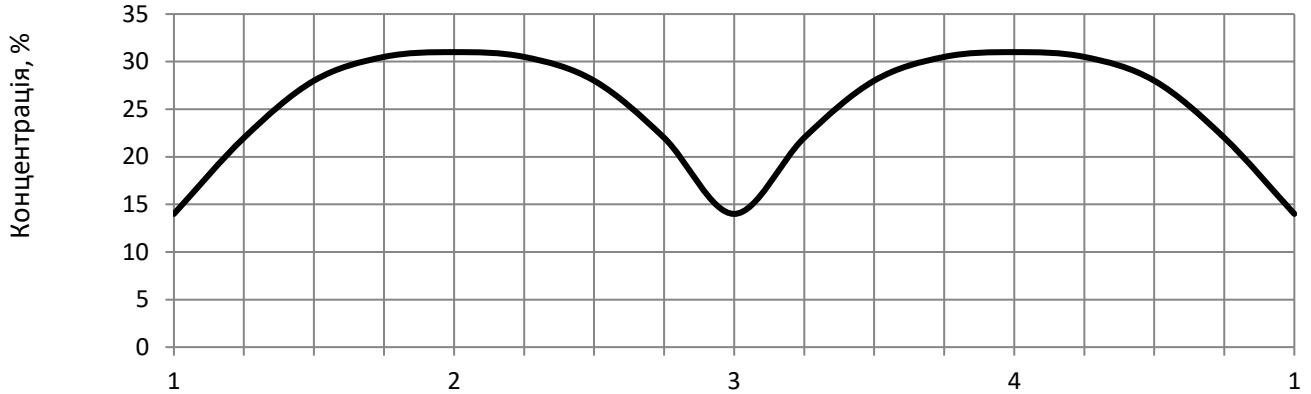


Рисунок 5 – Залежність концентрації наповнювача в композиційній стрічці за довжиною циліндричної поверхні під'ятника

Крім того, встановлено, що в разі застосування композиційної стрічки під час ремонту п'ятникового вузла вантажного вагона відбувається підвищення міцнісних та зносостійких властивостей циліндричної поверхні під'ятника, тобто в процесі експлуатації відремонтованого вагона зміниться й величина зносу.

Тому отримано вираз для величини зносу циліндричної поверхні під'ятника з урахуванням властивостей матриці та наповнювача навареної композиційної стрічки в такому вигляді:

$$\delta_{FN} = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1 (H_M + H_H + C_H(H_H + H_M)) L}{(E_M(1 - C_H) + E_H C_H)^2 (1 - \mu_1^2) H_H h d_1 \alpha} \frac{L}{v} \times \frac{\omega d_2 (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi)}{H_M + H_H - C_H(H_H - H_M)}. \quad (10)$$

На основі цього виразу побудовано залежності величини зносу під'ятника для піввагона моделі 12-7023, який рухається у складі поїзда зі швидкістю 90 км/год, за умов наварювання композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ (рис. 6, а) і складу Fe-Cr-Ni-TiC (рис. 6, б) з дискретними властивостями за діаметром під'ятника із коефіцієнтами використання пробігу 0,5 та 0,7.

З рис. 6 видно, що в разі виконання ремонту під'ятника навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC величина зносу циліндричної поверхні під'ятника для піввагона моделі 12-7023 на 9 % нижче порівняно зі зносом з навареною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂. Таке можна пояснити більшою твердістю та зносостійкістю композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC.

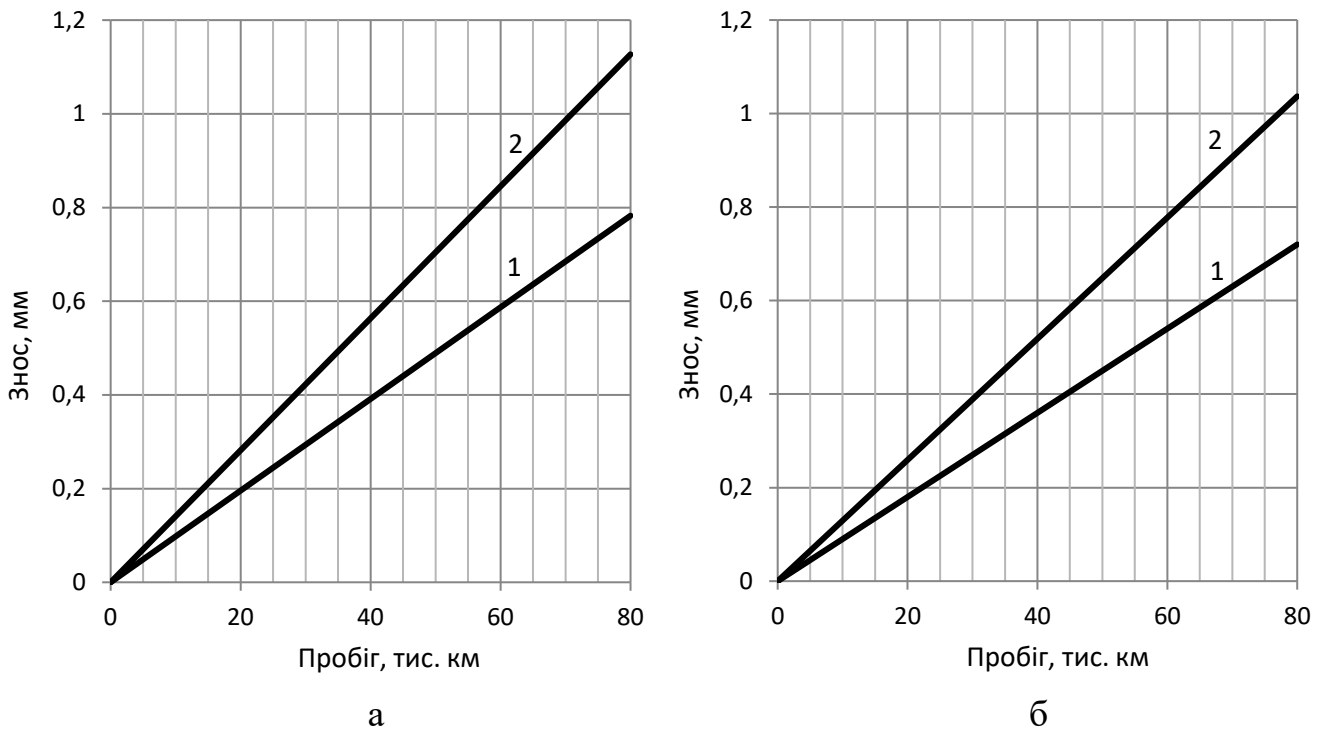


Рисунок 6 – Теоретичні залежності величини зносу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 з використанням композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ (а) і Fe-Cr-Ni-TiC (б) за коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,7

Прогнозований міжремонтний ресурс п'ятникового вузла піввагона моделі 12-7023 за зносом циліндричної поверхні підп'ятника становить 160 тис. км пробігу (за зносом п'ятника ця величина в 2,5...4 рази вище), тоді як мінімальне значення прогнозованого міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла цього самого піввагона з підп'ятниками, відремонтованими навареною композиційною стрічкою, становлять 320 тис. км (за зносом п'ятника ця величина у 2,0...3,0 рази вище), що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних заходів.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла. Дослідження структури, елементного складу та фізико-механічних властивостей наварених композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ та Fe-Cr-Ni-TiC показали, що компоненти стрічок після наварювання рівномірно розподілені по структурі з високою дифузійною активністю нікелю через його ультрадисперсну структуру, а хром і залізо мають звичайну структуру. Установлено, що мікротвердість матриці перебуває в проєктних межах і забезпечує працездатність навареної композиційної стрічки в умовах механізму абразивного зносу. У навареній композиційній стрічці, яка армована карбідом хрому, приблизно 60 % матриці має мікротвердість 6000...8000 МПа, що вказує на наявність у ній загартованих структур, а також продуктів хімічної взаємодії матричного хрому з вуглецем порошку заліза. Мікротвердість поверхневого шару навареної стрічки, яка армована TiC, є диференційованою, що вказує на наявність незначної кількості продуктів хімічної взаємодії компонентів, а мікротвердість сформованої матриці становить 3000...7000 МПа. Сформований відновлювальний шар циліндричних поверхонь підп'ятника з композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC має в 1,2...1,3

раза вищі значення величини середньої мікротвердості за глибиною від поверхневого шару порівняно із мікротвердістю шарів, сформованих композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂, що підтверджується вищою твердістю TiC порівняно з твердістю Cr₃C₂.

Також досліджена пористість утворених шарів, яка визначається концентрацією керамічного наповнювача. Установлено, що збільшення в стрічці його об'ємного вмісту призводить до зростання пористості. Композиційні стрічки з наповнювачем Cr₃C₂ мають на 3...8 % більшу щільність пористості, ніж стрічки, які містять наповнювач TiC.

Крім того, досліджено величини внутрішніх напружень композиційних стрічок і міцність їх зчеплення з основним металом, значення яких повною мірою задовольняють їх використання у п'ятниковому вузлі вантажних вагонів.

Випробування трьох пар дослідних зразків «вал-втулка» на машині тертя УМТ-2168 залежно від шляху тертя показали, що величина та інтенсивність зносу в зразків з навареними композиційними стрічками нижча в 1,7...2,7 раза порівняно з базовим варіантом. Величина сумарного зносу дослідних пар тертя з навареними композиційними стрічками також у 1,3...2,3 раза нижче порівняно з базовим варіантом. Також наведено залежності інтенсивності зносу зразків від зміни величини питомого навантаження й зміни величини швидкості ковзання. Отримані результати досліджень пари тертя «вал-втулка» підтвердили доцільність запропонованих технологічних рішень, спрямованих на відновлення поверхонь підп'ятника наварюванням композиційних стрічок, та їх працездатність і можливість підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажного вагона.

Стендові дослідження дали можливість установити відповідний рівень міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Так, моделюючи випадок повного завантаження вантажного вагона (23,5 т/вісь) у складі поїзда з 60 одиниць, величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки становить 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Величина зносу відремонтованих підп'ятників з привареними композиційними стрічками (для двох випадків) менша у 2,7...5,6 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 раза – порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла за умови повного завантаження вантажного вагона залежно від пробігу з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням під шаром флюсу, становлять 0,82 мм на 10 тис. км пробігу; з підп'ятниками, відремонтованими встановленням зносостійких елементів, – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Сумарна величина зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, менша у 2,7...4,7 раза порівняно з величиною сумарного зносу вузлів з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 раза нижче порівняно з величиною сумарного зносу п'ятникових вузлів з підп'ятниками, у які встановлені зносостійкі елементи.

Також моделювався випадок порожнього пробігу вантажного вагона в складі поїзда. Величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки залежно від пробігу при цьому має в 1,4...2,1 раза нижчі значення, ніж при повному завантаженні. Величина зносу поверхні підп'ятника, відремонтованої навареними

композиційними стрічками, менша у 2,8...4,0 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і у 2,1...3,5 раза нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла залежно від пробігу порожнього вагона має в 1,41...2,15 раза нижчі значення, ніж за повного завантаження. Величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, менша у 2,4...4,3 раза порівняно з величиною сумарного зносу сполучених поверхонь з підп'ятниками, що відремонтовані наплавленням, і у 2,0...3,7 раза нижче за сумарний знос сполучених поверхонь з підп'ятниками з установленими зносостійкими елементами.

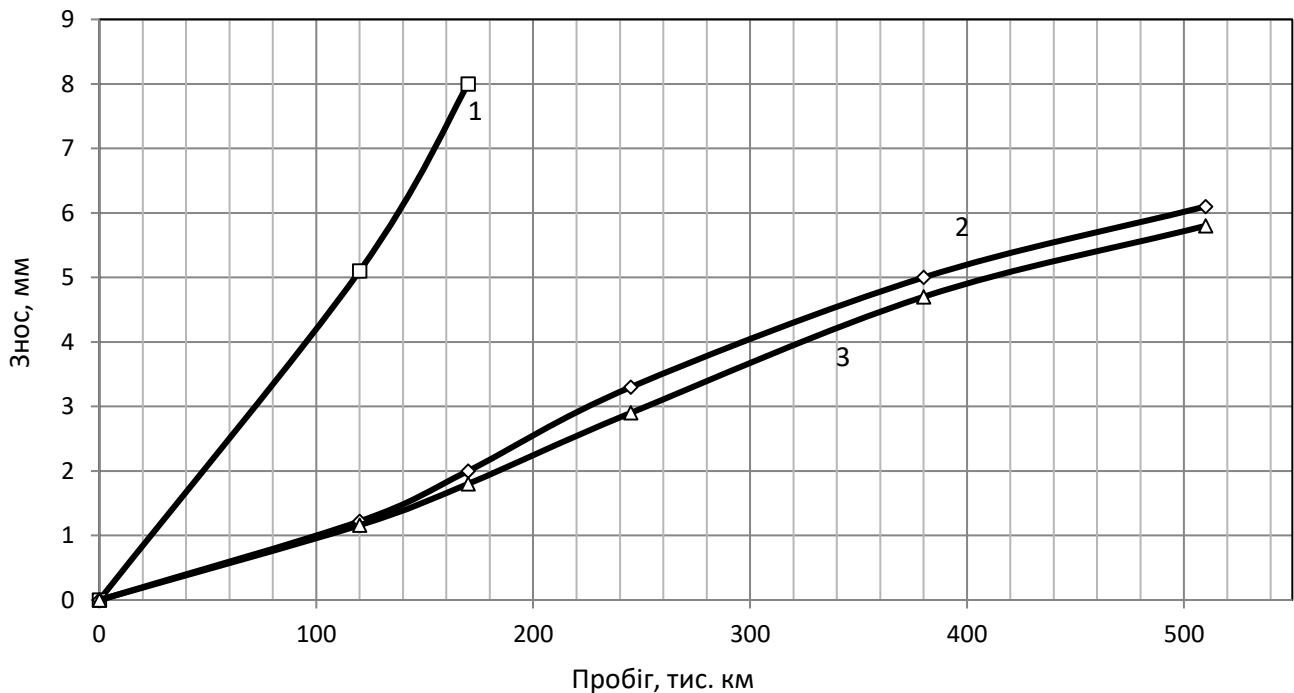
У п'ятому розділі наведено результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникового вузла.

Головним завданням було забезпечення рівномірного зносу за діаметром підп'ятника, оскільки на сьогодні підп'ятники потребують передчасного ремонту через підвищений знос вздовж осі в поздовжньому напрямку вантажного вагона. Застосування під час ремонту наплавлення електродами під шаром флюсу, а також зносостійких вставок забезпечує міжремонтний пробіг 160...250 тис. км, що відповідає 2 рокам експлуатації залежно від моделі вагона. Тому для вирівнювання величини зносу підп'ятника в усіх напрямках було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено застосування контактного наварювання композиційних стрічок змінної товщини з дискретною твердістю та зносостійкістю.

Результати експлуатаційних досліджень стану зносу підп'ятників надресорних балок відремонтованих піввагонів моделі 12-7023, які виконувалися упродовж 4 років, наведені на рис. 7.

Запропоновані залежності величини зносу підп'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023 залежно від пробігу (рис. 7) демонструють, що підп'ятники, відновлені наплавленням під шаром флюсу, на пробігу 160...180 тис. км за станом зносу вже потребують нового ремонту. Поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. До того ж величина їхнього зносу за пробігу 510 тис. км становить 5,8...6,1 мм.

Варто зауважити, що завдання із забезпечення рівномірного зносу за діаметром підп'ятника виконане. Так, циліндричні поверхні підп'ятника, що відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, мали рівномірно розподілений знос у поздовжньому і поперечному напрямках, а підп'ятники, відремонтовані наплавленням електродами під шаром флюсу, мали визначальний діаметр для визначення міжремонтного ресурсу вздовж осі піввагона, а в поперечному напрямку знос був у 1,2...2,0 рази нижчий порівняно з поздовжнім напрямком.



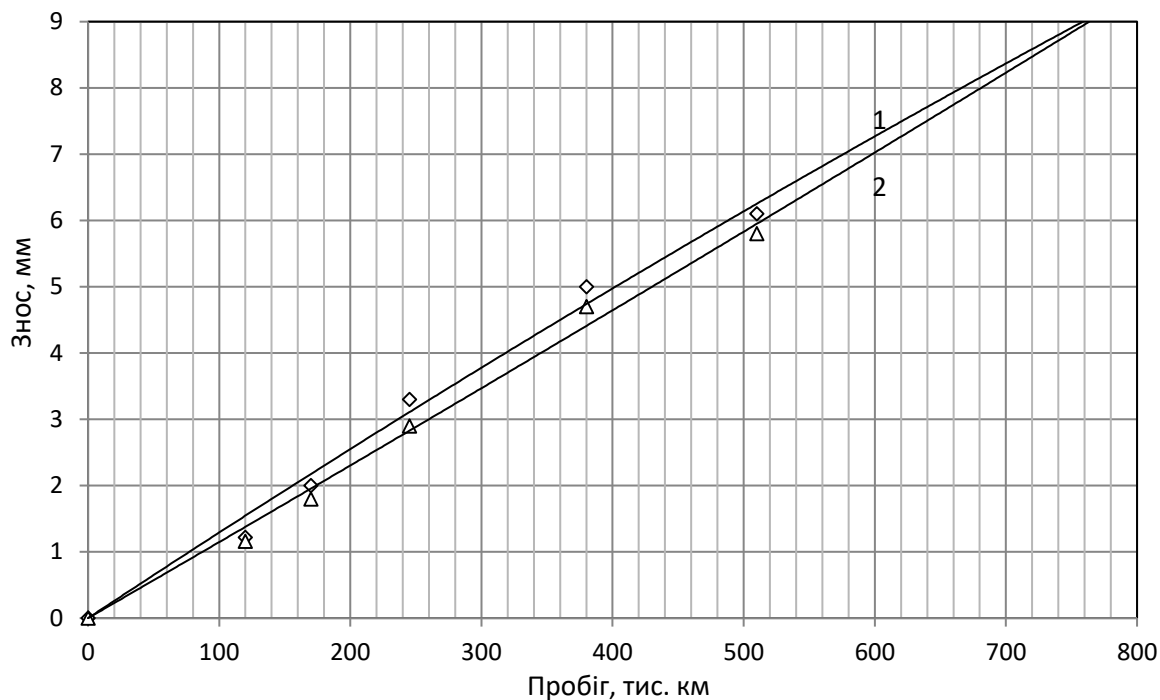
1 – поверхні відремонтовані наплавленням під шаром флюсу; 2 – поверхні відремонтовані наварюванням композиційної стрічки Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 3 – поверхні відремонтовані наварюванням композиційної стрічки Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 7 – Величина зносу підп'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023 залежно від пробігу з коефіцієнтом використання пробігу 0,5

Для прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів підп'ятника побудовано апроксимуючі лінії (рис. 8). Із цього рисунка бачимо, що ремонт підп'ятника за станом зносу необхідно виконувати за пробігу 660 тис. км для першого випадку та 680 тис. км – для другого випадку.

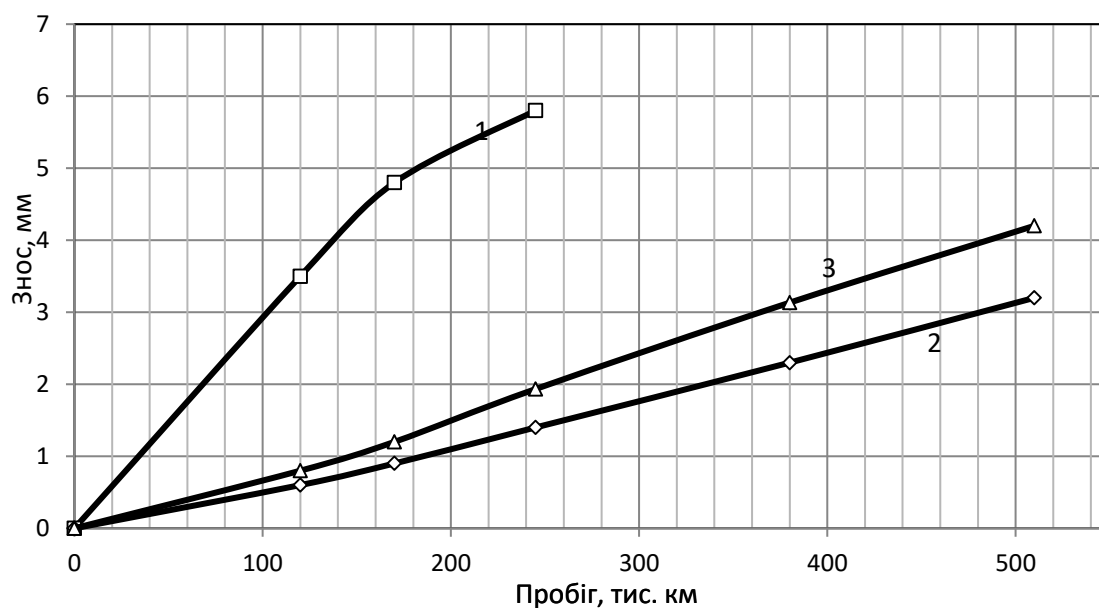
Результати величини зносу п'ятника для досліджуваних піввагонів наведено на рис. 9. Величина зносу п'ятників піввагонів моделі 12-7023 у разі взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими наплавленням під шаром флюсу, вкладається у нормативно встановлений термін проведення деповського ремонту за пробігу 250 тис. км. Проте такий вид відновлення підп'ятника не може забезпечити більший міжремонтний ресурс. Величина зносу п'ятників у разі взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, значно нижча (у 4,0...4,4 раза порівняно з базовим варіантом), що забезпечує їх більший міжремонтний ресурс.

Для прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона побудовано апроксимуючі лінії (рис. 10), які вказують на те, що міжремонтний пробіг для кривої 1 становить близько 1 млн км, для кривої 2 – 740 тис. км.



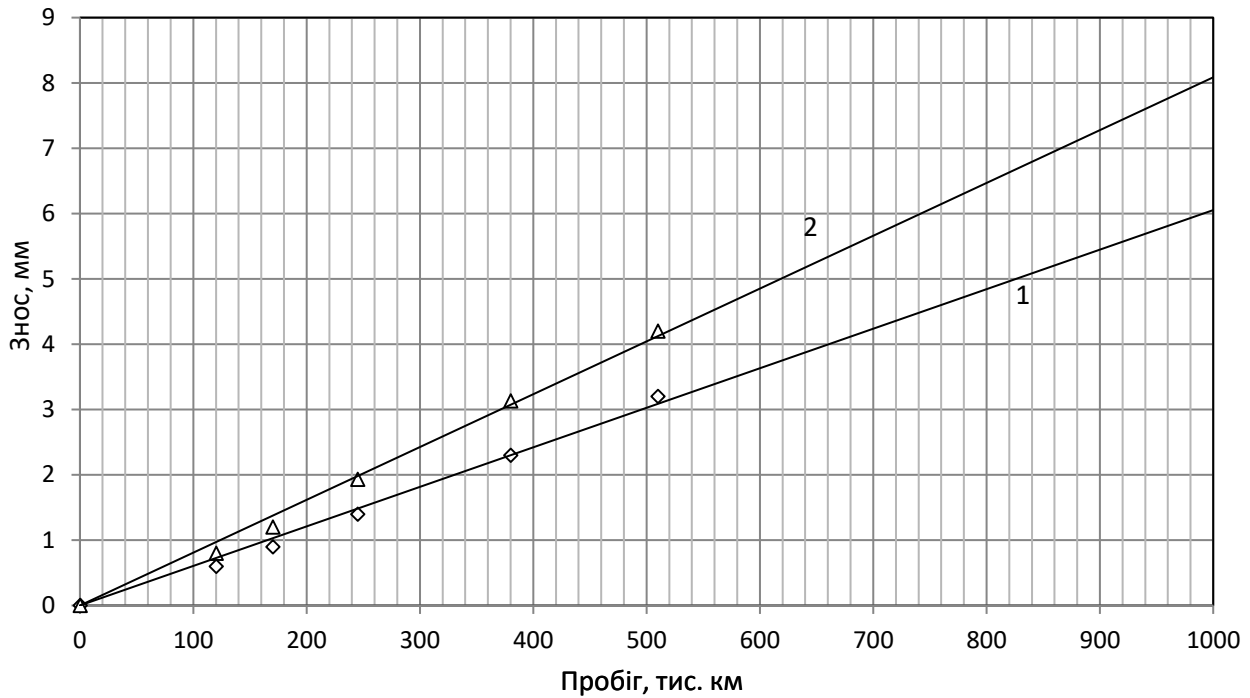
1 – склад стрічки Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 2 – склад стрічки Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 8 – Прогнозні лінії за допустимим зносом діаметрів підп'ятника, відновленого наварюванням композиційної стрічки



1 – підп'ятники відремонтовані наплавленням під шаром флюсу; 2 – підп'ятники відремонтовані наварюванням композиційної стрічки Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 3 – підп'ятники відремонтовані наварюванням композиційної стрічки Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 9 – Залежності зносу п'ятників піввагонів моделі 12-7023, що взаємодіяли з відремонтованими підп'ятниками, від пробігу з коефіцієнтом використання пробігу 0,5



1 – склад стрічки Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 2 – склад стрічки Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 10 – Прогнозні лінії міжремонтного ресурсу п'ятника за допустимим зносом діаметрів при взаємодії з підп'ятником, відновленим наварюванням композиційної стрічки

Наведені дані підтверджують доцільність застосування запропонованих технологічних рішень у ремонтній практиці всіх вагоноремонтних депо українських залізниць.

Відповідно до існуючої структури виконання ремонтів піввагонів моделі 12-7023 (рис. 11), міжремонтний пробіг цих піввагонів за станом зносу п'ятникового вузла не забезпечується.

Для підвищення міжремонтного ресурсу піввагона моделі 12-7023 за станом зносу п'ятникового вузла пропонується технологічне рішення у вигляді застосування контактного наварювання композиційних стрічок на циліндричну поверхню підп'ятників, яке має теоретичне обґрунтування, експериментальне та експлуатаційне підтвердження.

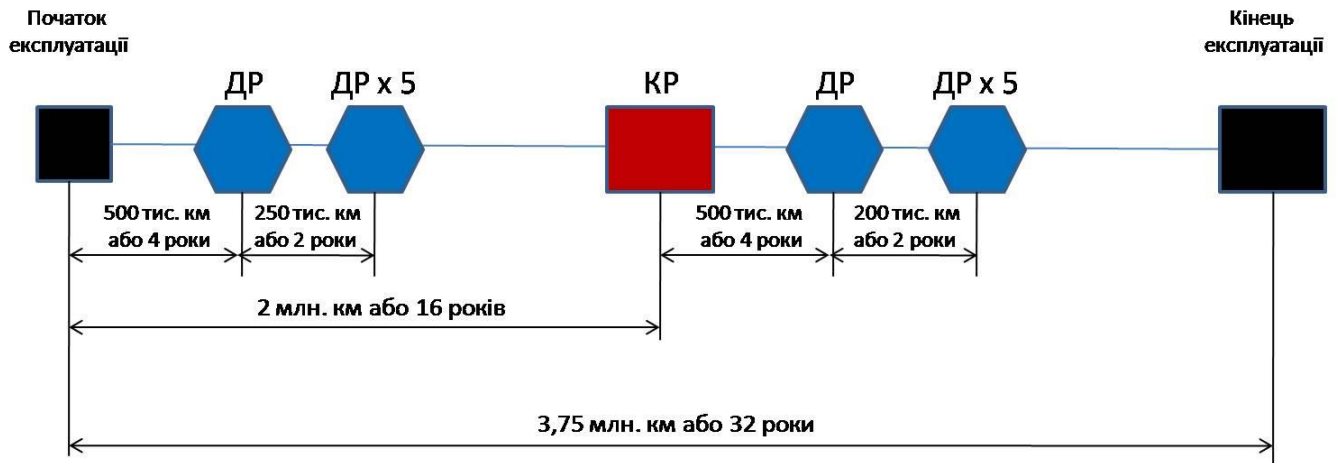


Рисунок 11 – Структура ремонту піввагона моделі 12-7023

Вищенаведені результати досліджень стану зносу п'ятникового вузла дають можливість стверджувати про зменшення величини та інтенсивності зносу і, відповідно, подовження терміну виконання деповського ремонту в 2 рази. Тоді можна забезпечити міжремонтний ресурс 500 тис. км пробігу, значення якого кратно до міжремонтного ресурсу інших ресурсовизначальних вузлів та деталей цього піввагона. Структура ремонтів піввагона моделі 12-7023 буде мати такий вигляд (рис. 12) із забезпеченням гарантованого міжремонтного ресурсу.

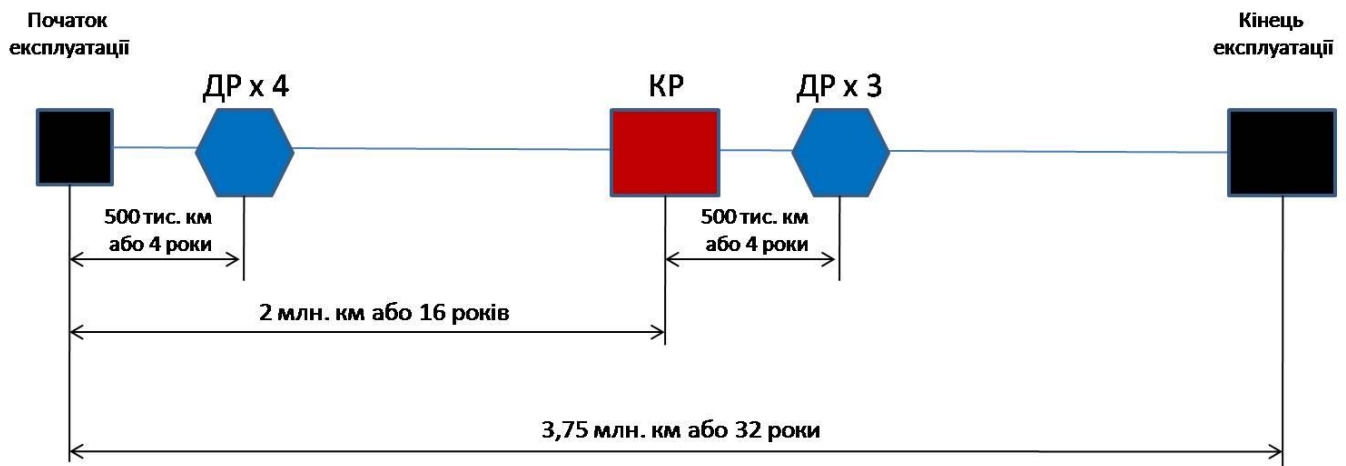


Рисунок 12 – Удосконалена структура ремонтів піввагона моделі 12-7023

Як бачимо з наведеної структури (рис. 12), кількість ремонтів піввагона моделі 12-7023 скорочується, а відповідно знижується і час простою в ремонті, що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних рішень, виходячи з техніко-економічного критерію.

Застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки дає змогу збільшити довговічність і міжремонтний ресурс п'ятникового вузла, що підтверджено результатами експлуатаційних випробувань.

Показники техніко-економічної ефективності застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Показники техніко-економічної ефективності застосування технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника	
		базовий варіант	запропонований
Площа поверхні, що відновлюється за рік	дм ²	4 239	4 239
Загальні капіталовкладення	грн	128 000	154 000
Питомі капіталовкладення	грн/дм ²	30,19	36,32
Собівартість відновлення 1 дм ² поверхні	грн	10,831	11,081
Річна економія	грн	-	4 959,75
Річний економічний ефект на 1 дм ² поверхні	грн	-	1,17
Строк окупності	років	-	1,9
Економічний ефект під час експлуатації п'ятникових вузлів	грн	-	75 032,1
Загальний економічний ефект	грн	-	79 991,85

Виконана техніко-економічна оцінка запропонованих технологічних рішень підтвердила їхню доцільність. Загальний економічний ефект від застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 року.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень у дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання з підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Зокрема, у теоретичному аспекті розроблено модель і запропоновано вирази для визначення стану зносу п'ятникового вузла з прогнозуванням міжремонтного ресурсу, що на практиці дає змогу зменшити витрати на ремонт завдяки підвищенню міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Загалом можна зробити такі висновки.

1. Аналіз несправностей вузлів вантажних вагонів на залізницях України показав, що понад 80 % візків вантажних вагонів є морально та фізично зношеними. Під час подальшої експлуатації це спричинятиме накопичення дефектів у металі з утворенням тріщин, що пов'язано зі зниженням втомної міцності, а також викликатиме раптові відмови вагонів. У результаті виконаного аналізу було визначено необхідність підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Розглянуті технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів із застосуванням техніко-економічного критерію дали змогу обґрунтувати доцільність використання контактного наварювання для їхнього ремонту.

2. Дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів виявили проблему передчасного виходу їх у ремонт через нерівномірний знос. Щоб запобігти передчасної потреби у ремонті п'ятникового вузла, запропоновано застосування методу контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок, що, на відміну від існуючих технологій відновлення, передбачає наварювання на поверхню зносу підп'ятника композиційної стрічки різної товщини з дискретною зносостійкістю. Крім того, запропоновано залежність для визначення концентрації наповнювача композиційної стрічки з урахуванням властивостей матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі вантажного вагона.

3. Виконано теоретичне обґрунтування підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей матеріалів сполучених поверхонь. Водночас уперше отримано модель для оцінки величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника, яка враховує фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі, і сумарні сили, що діють у поперечному й поздовжньому напрямках. Також вперше запропоновано вирази для визначення зазору в з'єднанні «п'ятник – підп'ятник», які враховують геометричне положення поверхонь, що взаємодіють, а також зміну величини зносу п'ятникового вузла в процесі експлуатації вантажного вагона. Удосконалено математичну модель геометрії зносу підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, що, на відміну від існуючої, дає змогу для відповідних початкових умов з урахуванням опорного стану підп'ятника визначати його знос і геометрію поверхні на визначеному етапі експлуатації вантажного вагона.

4. Виконані дослідження фізико-механічних та триботехнічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла підтвердили теоретичні передумови щодо підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. Стендові дослідження показали, що величина зносу відремонтованих підп'ятників з навареними композиційними стрічками є в 2,7...5,6 рази меншою порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 рази нижчою порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла в умовах повного завантаження вантажного вагона залежно від пробігу становлять: з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням під шаром флюсу, – 0,82 мм на 10 тис. км пробігу; з підп'ятниками, відремонтованими встановленням зносостійких елементів, – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Сумарна величина зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, у 2,7...4,7 рази менша порівняно з величиною сумарного зносу вузлів з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 рази нижча порівняно з величиною сумарного зносу п'ятникових вузлів з підп'ятниками, у які встановлені зносостійкі елементи.

5. Експлуатаційні дослідження з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів моделі 12-7023 також підтвердили доцільність застосування контактної наварювання зносостійких композиційних стрічок. Установлено, що поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних

стрічок на основі Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. До того ж величина зносу за пробігу 510 тис. км становила 5,8...6,1 мм. Прогнозні значення міжремонтного ресурсу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 за станом зносу відповідають пробігу 660 тис. км і 680 тис. км для двох випадків складу композиційних стрічок. Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона моделі 12-7023 показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ становить близько 1 млн км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км.

6. Виконано техніко-економічну оцінку запропонованих технологічних рішень, яка підтвердила їхню доцільність. Загальний економічний ефект від застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням зносостійкою композиційною стрічкою становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 роки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

– у фахових виданнях, затверджених МОН України:

1. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності вантажних вагонів із застосуванням нових технологій виготовлення та відновлення робочих поверхонь. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: запропоновано метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок для відновлення поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона)
2. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 79–87. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: виконано аналіз зносів підп'ятників та запропоновано модель геометрії зносу підп'ятника)
3. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д. О. Залежність величини зносу пари тертя «п'ятник – підп'ятник» від пробігу вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 61–69. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: побудовано залежність середньої величини зносу підп'ятника для випадків із різними значеннями коефіцієнта використання пробігу)

– у закордонних фахових виданнях:

4. Baranovskyi D., Myamlin S., Muradian L., Bulakh M., Podosonov D. Determination of the Filler Concentration of the Composite Tape. *Appl. Sci.* 2022. 12(21), 11044. <https://doi.org/10.3390/app122111044>. (Scopus, Web of Science) (Особисто здобувачем: обґрунтовано застосування контактного зварювання при використанні композиційної стрічки із змінними трибомеханічними властивостями)
5. Baranovskyi D., Myamlin S., Podosonov D., Muradian L. Determination of the filler concentration of the composite material to reduce the wear of the central bowl of the rail truck bolster. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, is. 12.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102232>. (Scopus) (Особисто здобувачем: отримано математичну модель розподілу концентрації наповнювача в проектованій композитній стрічці)

– **додаткові наукові праці:**

6. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонний парк*. 2017. № 3-4. С. 62–64. (Особисто здобувачем: запропоновано технічні рішення до удосконалення п'ятникового вузла вантажного вагона)
7. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний трансп. України*. 2018. № 1. С. 34–41. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.) (Особисто здобувачем: проведено аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості вагонних деталей).
- **праці апробаційного характеру:**
8. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д. О., Піценко І. В. Дослідження несправностей пасажирських вагонів. Сучасний рух науки: тези доп. IX міжнарод. науково-практ. інтернет-конф., 2-3 грудня 2019 р. Дніпро : Редакція Міжнарод. Електрон. науково-практ. журн. «WayScience», 2019. Т.2. С. 548–553. (Особисто здобувачем: виконано аналіз пошкоджень вагонів в експлуатації)
9. Мурадян Л.А., Подосьонов Д.О. Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця» / Матеріали 76 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 19-20.05.2016. С. 22-23. (Особисто здобувачем: отримано результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникових вузлів вагонів)
10. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. *Матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 17-18.05.2018. Дніпро, 2018. С. 40–41. (Особисто здобувачем: отримано залежність зносу центральної колодки від пробігу, враховуючи силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості взаємодіючих матеріалів)
11. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла. *Матеріали 79-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 16-17.05.2019. Дніпро, 2019. С. 59–61. (Особисто здобувачем: проведено експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла)
12. Мурадян Л.А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д.О. Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла вантажних вагонів / Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 22-23.04.2021 Дніпро С. 38-39. (Особисто здобувачем: запропоновано технологічний процес контактного наварювання п'ятникових вузлів вантажних вагонів)

АНОТАЦІЯ

Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникових вузлів вантажних вагонів шляхом удосконалення технології їх відновлення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» (Галузь знань: J7 – Транспорт та послуги). – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального науково-прикладного завдання з підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Зокрема, у теоретичному аспекті розроблено модель і запропоновано вирази для визначення стану зносу п'ятникового вузла з прогнозуванням міжремонтного ресурсу, що на практиці дає змогу зменшити витрати на ремонт завдяки підвищенню міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Виконано теоретичне обґрунтування підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей сполучених поверхонь п'ятникового вузла. Водночас уперше отримано модель для оцінки величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника, яка враховує фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі, і сумарні сили, що діють у поперечному й поздовжньому напрямках. Також вперше запропоновано вирази для визначення зазору в з'єднанні «п'ятник – підп'ятник», які враховують геометричне положення поверхонь, що взаємодіють, а також зміну величини зносу п'ятникового вузла в процесі експлуатації вантажного вагона. Експлуатаційні дослідження з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів моделі 12-7023 підтвердили доцільність застосування контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок.

ABSTRACT

Podosyonov D. O. Development and improvement of existing technologies of resource-determining surfaces of freight cars. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.07 “Railway rolling stock and train traction” (Field of knowledge: j7 – Transport and technology). – Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and applied problem of increasing the service life of the foot assemblies of freight cars. At the same time, in the theoretical aspect, a model has been developed and expressions have been proposed for determining the state of wear of the foot assembly with the forecast of the service life, which in practical terms allows reducing repair costs by increasing the service life of the foot assemblies of freight cars.

In the first section, an analysis of the faults of freight cars that led to transport incidents was carried out. As a result, the need to increase the service life of the foot assembly of freight cars was identified. Therefore, technological methods for repairing and increasing the wear resistance of the foot assemblies were considered, as a result of applying the technical and economic criterion, it was established that the most attractive technological

methods are laser and plasma surfacing, despite the high cost of these methods, they provide the highest value of the service life between repairs of foot assemblies. Taking into account the simplicity of application, it was proposed to use contact welding for repairing foot assemblies. This method does not require additional special equipment, that is, industrial transformers and other means of wagon repair enterprises can be used.

In the second section, a study of the operational wear of foot assemblies and thrust washers of the spring beams of freight wagon bogies was carried out. As a result of the conducted studies of the operational wear of the thrust bearings and thrust bearings of the bogie beams of freight cars, it was established that the uncoupling for premature repair when forecasted for the ultimate wear of the thrust bearing occurs when the freight car has run for 174 thousand km, and for the wear of the thrust bearing, the forecasted service life is 320 thousand km. That is, the resource-intensive element of the freight car is the thrust bearing, which has an insufficient service life, and to achieve the service life of 300 thousand km, it is necessary to increase its wear resistance.

The third section presents the results of theoretical studies of the service life of freight car bogies, in which the thrust bearing assembly is the resource-generating element. When considering the interaction of the elements of the pair "thrust bearing - thrust bearing" of a freight car at the moment of applying traction force, an expression for determining the gap is proposed. The use of composite strips for welding them onto the cylindrical surface of the thrust bearing is theoretically justified. It has been established that when using a composite tape during the repair of the freight car's footrest assembly, the strength and wear-resistant properties of the cylindrical surface of the thrust bearing increase, i.e. during the operation of the repaired car, the wear value will also change, which is 2...2.7 times less than in the base version.

The fourth section presents the results of the study of the physical, mechanical and tribotechnical properties of the restored surfaces of the piston assembly, which confirmed the theoretical prerequisites for increasing the service life of the piston assemblies. Bench studies have shown that the wear rate of repaired thrust bearings with welded composite strips is 2.7...5.6 times lower than the wear rate of thrust bearings repaired by surfacing and 1.6...4.3 times lower than the wear rate of thrust bearings with installed wear-resistant elements.

The fifth section presents the results of operational studies to determine the service life between overhauls of thrust assemblies of freight cars of model 12-7023, which also confirmed the feasibility of using contact welding of wear-resistant composite strips. The predicted values of the service life between overhauls of the thrust bearing of the gondola car model 12-7023 in terms of wear are 660 thousand km and 680 thousand km of mileage, respectively, for the two cases. Forecasting the service life between overhauls based on the permissible wear of the diameters of the thrust bearings of the gondola car model 12-7023 showed that the mileage before repair for thrust bearings with welded composite strips Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ is about 1 million. km, and for thrust bearings with welded composite strips Fe-Cr-Ni-TiC – 740 thousand km. The overall economic effect of applying the proposed technology of restoring the thrust bearing by contact welding with a wear-resistant composite strip is 79991.85 UAH, and the payback period is 1.9 years.

Keywords: repair, wear, freight car, thrust bearing, thrust bearing, resource, operation, forecasting, restoration, strengthening.

ПОДОСЬОНОВ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ П'ЯТНИКОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ
ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 24.10.2025

Формат паперу 60x84 1/16.
Ум.др.арк. 1,90. Обл.вид.арк. 9.
Зам. № 1 Тираж 100 пр.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010