

С. Ю. Сапронова

Національний транспортний університет
вул. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна
Тел.: +380505834854, E-mail: doc.sapronova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

О. В. Воробйов

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна
Тел.: +380500527950, E-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6546-4434>

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СПОСОБУ
ВІДНОВЛЕННЯ КОЛІС ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ
ПРИ НАДНОРМАТИВНОМУ ЗНОСІ ГРЕБЕНЯ
НА ОСНОВІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО КРИТЕРІЮ**

Метою роботи є обґрунтування вибору способу відновлення коліс залізничного рухомого складу при наднормативному зносі гребеня на основі техніко-економічного критерію, який дозволяє врахувати як технічну ефективність відновлення, так і витрати життєвого циклу колеса.

У роботі використано аналітичний підхід, що базується на узагальненні сучасних наукових досліджень у сфері економічного перепрофілювання, оптимізації профілів коліс, локального відновлення наплавленням та діагностики причин інтенсивного зносу гребеня. Для оцінювання ефективності способів відновлення запропоновано інтегральний технічний критерій, який враховує ступінь зносу гребеня, зменшення діаметра колеса, інтенсивність подальшого зносу та залишковий ресурс після відновлення. Додатково сформовано економічний критерій, заснований на питомих витратах на одиницю залишкового ресурсу.

Виконано порівняльну оцінку трьох способів відновлення: стандартного перепрофілювання, перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня та наплавлення. Побудовано залежності технічних і економічних критеріїв від ступеня наднормативного зносу гребеня та сформовано карту рішень щодо раціональних областей застосування кожного способу.

Встановлено, що зі зростанням зносу ефективність традиційного перепрофілювання знижується через значні втрати металу та скорочення ресурсу колеса. Запропоновано техніко-економічний підхід до вибору способу відновлення коліс при наднормативному зносі гребеня, що поєднує інтегральний технічний критерій, економічну модель та карту рішень.

Результати можуть бути використані у вагонних і локомотивних депо, на ремонтних підприємствах, а також при розробленні рекомендацій і нормативів щодо раціонального відновлення коліс рухомого складу.

© Сапронова С. Ю., Воробйов О. В., 2026

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Ключові слова: залізничний транспорт, залізничне колесо, наднормативний знос гребенів, перепрофілювання, наплавлення, критерій прийняття рішення.

Вступ. Залізничний транспорт є однією з ключових складових транспортної системи, що забезпечує перевезення вантажів і пасажирів з високим рівнем енергоефективності та надійності. Безпека та ефективність функціонування залізничного транспорту визначаються технічним станом рухомого складу, зокрема колісних пар, які працюють у складних умовах контактної взаємодії з рейками.

У процесі експлуатації, колеса рухомого складу зазнають інтенсивного зносу внаслідок дії контактних напружень, тертя, ударних навантажень, а також складних умов руху в кривих ділянках колії. Одним із найбільш характерних і небезпечних видів зносу є знос гребеня колеса, що проявляється у вигляді його підрізу. Підріз гребеня призводить до зміни геометрії профілю колеса, погіршення умов контакту в системі «колесо-рейка», підвищення рівня бокових сил, а також до зростання ризику сходу рухомого складу з рейок.

Інтенсивність зносу гребеня визначається комплексом факторів, серед яких особливе значення мають радіуси кривих колії, стан рейкових профілів, рівень навантаження бокової поверхні рейки, параметри навантаження на вісь, а також геометрія самого колеса. При цьому в умовах сучасної експлуатації, що характеризується збільшенням інтенсивності руху, швидкостей та осьових навантажень, проблема підрізу гребеня набуває ще більшої актуальності.

Для відновлення експлуатаційних характеристик коліс застосовують різні технологічні методи, серед яких найбільш поширеним є перепрофілювання (обточування) до стандартного профілю. Однак при значному підрізі гребеня цей спосіб має суттєвий недолік – необхідність зняття значного обсягу металу, що призводить до зменшення діаметра колеса і, відповідно, до скорочення його залишкового ресурсу. У ряді випадків це може спричинити передчасне вибракування коліс, що негативно впливає на економічну ефективність експлуатації рухомого складу.

Альтернативою традиційному перепрофілюванню є застосування економічного перепрофілювання, яке дозволяє зменшити обсяг зняття металу, а також використання технологій відновлення матеріалу, зокрема наплавлення гребеня. Однак кожен із зазначених способів має свої переваги та обмеження, пов'язані з технологічною складністю, вартістю, довговічністю відновленого шару та умовами подальшої експлуатації.

Питання комплексного вибору раціонального способу відновлення коліс при значному підрізі гребеня, який би одночасно враховував геометричні параметри зносу, втрати металу, залишковий ресурс і економічну ефективність, залишається недостатньо розробленим.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.

Дослідження [1] є дуже важливим для розуміння і впровадження сучасних методів оптимізації і відновлення коліс колісних пар залізничного рухомого складу з використанням ресурсозберігаючих технологій. Автори фокусуються не лише на самому процесі відновлення, а й на збереженні ресурсу колеса і підтверджують: відновлення коліс повинно розглядатися не як ізольована технологічна операція, а як елемент управління ресурсом колісної пари. Разом з тим, дослідження має певні обмеження, які спираються на геометричні характеристики профілю колеса і мають порівняння лише двох видів відновлення коліс – повної обточки і часткового перепрофілювання.

Одна з базових робіт щодо часткового відновлення коліс [2], в якій розглядають колеса, обточені зі зменшеною товщиною гребеня, та прогнозують їхній знос і можливий вплив на рейку. Але дослідження сконцентровано передусім на прогнозуванні зносу після перепрофілювання тонкого гребеня, а не на задачі вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня.

Дослідження [3] пов'язане з наплавленням, як методом відновлення коліс. Автори зосереджуються на технології дугового наплавлення під флюсом і детально досліджують мікроструктуру, механічні характеристики та зносостійкість відновленого шару. Автори доводять, що наплавлення є не просто теоретично можливою, а практично реалізованою альтернативою списанню колеса або надмірному обточуванню. Робота більше орієнтована на технологічну й матеріалознавчу оцінку відновленого шару, ніж на аналіз ресурсу, втрат металу та економічної доцільності в межах життєвого циклу колеса.

В [4] автори розглядають колеса, обточені зі зменшеною товщиною гребеня, та прогнозують їхній знос і можливий вплив на рейку. Дослідження сконцентровано передусім на прогнозуванні зносу після часткового відновлення тонкого гребеня, а не на задачі вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня. Робота не включає економічний блок у повному обсязі і не використовує інтегральний критерій, який би одночасно враховував ресурс, втрати металу і матеріальні витрати. Робота [5] є продовженням попереднього напрямку і вже більш прямо пов'язана з підвищенням ефективності обслуговування через використання економічної доцільності часткового перепрофілювання і полягає в поєднанні прогнозних моделей зносу та ремонтної стратегії.

У роботі [6] автори пропонують профіль зі зменшеним зносом гребеня та показують можливість оптимізації обслуговування за рахунок геометричного удосконалення профілю. Однак обмеженням є те, що стаття зосереджується на профілактиці або сповільненні зносу, а не на виборі оптимального способу відновлення вже при сформованому наднормативному зносі.

Автори [7] пропонують профіль зі зменшеним зносом гребеня та показують можливість оптимізації обслуговування за рахунок геометричного удосконалення профілю і зв'язок між геометрією профілю та матеріаломісткістю наступного відновлення.

Причини виникнення інтенсивного зносу гребеня детально досліджують в роботі [8] і пропонують заходи з його усунення. Показано системний характер проблеми: наднормативний знос гребеня коліс поїздів метрополітену є наслідком не лише стану коліс, а й кривизни колії, мащення, стану рейок, режимів руху.

Публікація [9] важлива тим, що розвиває напрям часткового відновлення вже для високошвидкісного рухомого складу. Автори аналізують зносостійкість тонкого гребеня та його поведінку в експлуатації і доводять, що знос гребеня є не випадковим локальним рішенням, а окремим науковим і практичним напрямом. Водночас це дослідження обмежене саме сферою високошвидкісного транспорту, де динаміка, профілі й вимоги суттєво відрізняються від загального парку рухомого складу.

Лазерне відновлення коліс в роботі [10] розглядається як перспективна технологія для їх відновлення. Автори аналізують знос і контактнo-втомну поведінку відновлених ділянок і показують, що відновлення матеріалу може бути складним, але перспективним шляхом. Акцент зроблено на локальних дефектах і

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

лазерному відновленні. Економічний блок і системне порівняння з іншими технологіями в цій статті відсутні.

Роботи [11-16] присвячені фундаментальним дослідженням з чисельного моделювання зносу коліс, контактної втоми коліс і рейок, механізмів контакту, зносу, втоми та динаміки рухомого складу.

Прогнозування зносу гребеня в кривих ділянках колії та стрілочних переводах, як напряду впливають на інтенсивне зношування гребенів коліс розглянуті в роботах [17-19].

Аналіз публікацій [1-19] показав, що дослідження з відновлення коліс рухомого складу при наднормативному зносі гребенів розвивалися переважно у чотирьох напрямках: економічне перепрофілювання коліс із формуванням нових профілів, оптимізація геометрії профілю для зниження інтенсивності зносу гребеня, відновлення локально зношених зон методами наплавлення, діагностика та моделювання зношених профілів коліс (рис. 1).

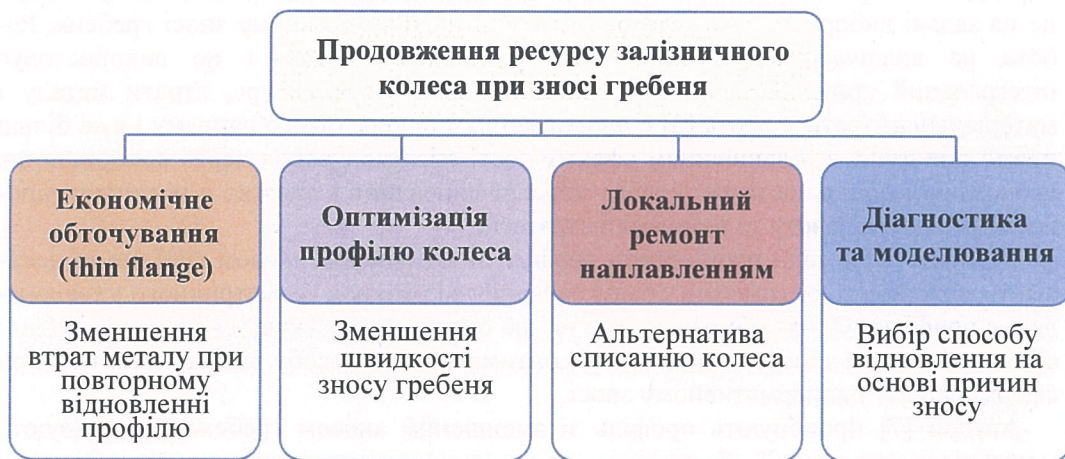


Рис. 1. Основні напрямки наукових досліджень

При цьому недостатньо дослідженим залишається питання обґрунтування вибору раціонального способу відновлення коліс при наднормативному зносі гребеня на основі єдиного техніко-економічного критерію, який би враховував втрати металу, залишковий ресурс, інтенсивність подальшого зносу та витрати життєвого циклу.

Постановка проблеми. Виникає науково-практична проблема, яка полягає у необхідності розроблення підходу до обґрунтованого вибору способу відновлення коліс, що дозволив би мінімізувати втрати металу, підвищити ресурс колісних пар і забезпечити економічну доцільність їх експлуатації.

Метою даного дослідження є розроблення техніко-економічного критерію вибору раціонального способу відновлення коліс рухомого складу при наднормативному підрізі гребеня з урахуванням параметрів зносу, умов експлуатації та витрат життєвого циклу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі: проаналізувати існуючі способи відновлення; встановити залежність між параметрами зносу та обсягом об-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

робки; оцінити вплив відновлення на ресурс колеса; розробити критерій вибору способу відновлення; провести порівняльну оцінку методів.

Методи дослідження. В дослідженні висунуто гіпотезу: при наднормативних підрізах гребеня колеса традиційне перепрофілювання до стандартного профілю є неефективним, оскільки призводить до надмірного зняття металу; натомість застосування оптимізованих профілів, або локального відновлення матеріалу дозволяє зменшити обсяг обробки та продовжити ресурс колеса. Введення критерію вибору способу відновлення коліс, який враховує співвідношення між глибиною підрізу гребеня, допустимим зменшенням діаметра колеса та очікуваною інтенсивністю подальшого зносу, дозволяє підвищити ефективність експлуатації колісних пар за рахунок збільшення кількості ремонтних циклів та зниження сумарних витрат життєвого циклу.

Методика дослідження спрямована на розроблення науково обґрунтованого підходу до вибору раціонального способу відновлення коліс рухомого складу при значному підрізі гребеня. Основою методики є комплексний аналіз взаємозв'язку між геометричними параметрами зносу гребеня, обсягом матеріалу, що видаляється або відновлюється, та залишковим ресурсом колеса після виконання відновлювальних операцій.

У межах дослідження розглядаються три основні способи відновлення:

- традиційне перепрофілювання (обточування) до стандартного профілю;
- економічне (часткове) перепрофілювання із зменшеною товщиною гребеня;
- відновлення гребеня шляхом наплавлення.

Для кількісної оцінки ступеня підрізу гребеня введено безрозмірний параметр:

$$\delta_f = \frac{t_{nom} - t_{fact}}{t_{nom}}, \quad (1)$$

де t_{nom} – номінальна товщина гребеня колеса;

t_{fact} – фактична товщина гребеня.

Даний параметр характеризує відносну глибину підрізу гребеня та дозволяє уніфікувати оцінку стану колеса незалежно від типу профілю.

Зменшення діаметра колеса при перепрофілюванні визначається як

$$\Delta D = D_0 - D_1, \quad (2)$$

де D_0 – початковий діаметр колеса;

D_1 – діаметр після відновлення профілю.

Величина ΔD є ключовим параметром, що визначає втрату ресурсу колеса, оскільки кожне перепрофілювання зменшує можливу кількість наступних ремонтних циклів.

Залишковий ресурс колеса після відновлення визначається як функція від: зменшення діаметра ΔD ; умов експлуатації; обраного способу відновлення.

У загальному вигляді

$$L_{res} = f(\Delta D, I_{wear}, \delta_f), \quad (3)$$

де I_{wear} – інтенсивність подальшого зносу гребеня.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Інтенсивність зносу визначимо як

$$I_{wear} = \frac{\Delta h}{L}, \quad (4)$$

де Δh – зміна товщини гребеня;

L – пробіг колісної пари.

Цей параметр залежить від геометрії профілю після відновлення; умов контакту колесо–рейка; експлуатаційних факторів (кривизна колії, мащення, навантаження).

Для вибору раціонального способу відновлення запропоновано інтегральний критерій ефективності відновлення

$$K = \frac{L_{res}}{\Delta D \cdot I_{wear}} \cdot \frac{1}{\delta_f}. \quad (5)$$

Критерій враховує довговічність після ремонту (L_{res}); втрати матеріалу при зміні діаметру колеса (ΔD); швидкість повторного зносу (I_{wear}); ступінь підрізу гребеня (δ_f). Максимальне значення K відповідає найбільш ефективному способу відновлення (рис. 2).

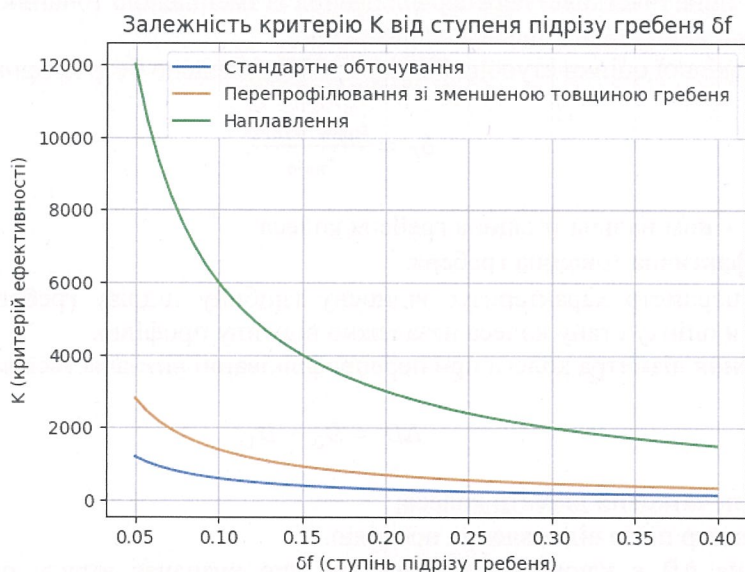


Рис. 2. Залежність інтегрального критерію K від ступеня підрізу гребеня δ_f для різних способів відновлення

Як видно з рис. 2, зі збільшенням ступеня підрізу гребеня δ_f значення критерію ефективності K зменшується для всіх способів відновлення. Найбільш різке зниження характерне для стандартного перепрофілювання, що обумовлено значними втратами металу. Метод часткового перепрофілювання демонструє помірну

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

залежність, тоді як наплавлення забезпечує найвищі значення критерію ефективності та найменшу чутливість до зростання зносу.

Під час вибору способу відновлення колеса при підрізі гребеня необхідно враховувати не лише технічну можливість виконання ремонту, а й його економічну доцільність. Один і той самий спосіб може бути технологічно придатним, але економічно неефективним через значні втрати металу, зменшення кількості наступних ремонтних циклів або підвищену інтенсивність повторного зносу.

У зв'язку з цим доцільно оцінювати спосіб відновлення за сукупними приведеними витратами на життєвий цикл колеса після відновлення.

Пропонується використовувати питомі витрати на одиницю залишкового ресурсу, як цільову функція – основний економічний показник

$$E_i = \frac{C_i}{L_{res,i}}, \quad (6)$$

де E_i – питомі витрати для i -го способу відновлення, грн/км;

C_i – сукупні витрати на відновлення та подальшу експлуатацію колеса після застосування i -го способу, грн;

$L_{res,i}$ – залишковий ресурс колеса після відновлення, км.

Раціональним вважається той спосіб, для якого значення E_i є мінімальним

$$E_i \rightarrow \min.$$

Сукупні витрати на відновлення пропонується визначати як

$$C_i = C_{r,i} + C_{m,i} + C_{d,i} + C_{w,i} + C_{risk,i}, \quad (7)$$

де $C_{r,i}$ – прямі витрати на виконання ремонту;

$C_{m,i}$ – витрати, пов'язані з втратою металу колеса;

$C_{d,i}$ – витрати, пов'язані з простоем рухомого складу;

$C_{w,i}$ – витрати на подальше відновлення коліс в експлуатації;

$C_{risk,i}$ – очікувані витрати, пов'язані з ризиком передчасного повторного ремонту або браку.

Прямі витрати на відновлення

$$C_{r,i} = C_{lab,i} + C_{eq,i} + C_{mat,i} + C_{en,i}, \quad (8)$$

де $C_{lab,i}$ – витрати на оплату праці;

$C_{eq,i}$ – витрати на використання обладнання;

$C_{mat,i}$ – витрати на матеріали;

$C_{en,i}$ – витрати на енергоносії.

Для стандартного перепрофілювання матеріальні витрати зазвичай мінімальні, але високими можуть бути втрати металу. Для наплавлення, навпаки, прямі витрати вищі через присадний матеріал, підготовку поверхні та термічні режими.

Одним із ключових елементів моделі є економічна оцінка втрати металу, яка прямо пов'язана зі зменшенням діаметра колеса.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$C_{m,i} = c_D \cdot \Delta D_i, \quad (9)$$

де c_D – вартість 1 мм зменшення діаметра колеса, грн/мм;

ΔD_i – зменшення діаметра колеса після i -го способу відновлення, мм.

Цей компонент є принципово важливим, оскільки кожне зменшення діаметра знижує потенційну кількість майбутніх ремонтних циклів і наближає колесо до вибракування.

Витрати на простій можна визначити так

$$C_{d,i} = c_t \cdot T_i, \quad (10)$$

де c_t – вартість 1 години простою, грн/год;

T_i – тривалість виконання ремонту, год.

Для перепрофілювання T_i зазвичай менший, ніж для наплавлення, але цей ви-
граш у часі не завжди компенсує втрату ресурсу.

Подальше зношування колеса після відновлення також має економічний зміст, оскільки воно визначає частоту повторних відновлень. Пропонується оцінювати його як

$$C_{w,i} = c_w \cdot I_{wear,i} \cdot L_{res,i}, \quad (11)$$

де c_w – коефіцієнт економічної оцінки наслідків зносу;

$I_{wear,i}$ – інтенсивність зносу після відновлення, мм/км;

$L_{res,i}$ – ресурс після відновлення, км.

Якщо спосіб відновлення має підвищену ймовірність повторного дострокового ремонту або дефектоутворення, це доцільно враховувати через ризикову складову

$$C_{risk,i} = p_i \cdot C_{rep}, \quad (12)$$

де p_i – ймовірність передчасного повторного ремонту;

C_{rep} – вартість повторного ремонту або заміни.

Ця складова особливо важлива для наплавлення, якщо існує ризик тріщиноутворення або нестабільної якості відновленого шару.

Підставивши всі складові в основний економічний показник, отримаємо

$$E_i = \frac{C_{lab,i} + C_{eq,i} + C_{mat,i} + C_{en,i} + c_D \cdot \Delta D_i + c_t \cdot T_i + c_w \cdot I_{wear,i} \cdot L_{res,i} + p_i \cdot C_{rep}}{L_{res,i}}. \quad (13)$$

Цей показник дозволяє порівнювати різні способи відновлення за критерієм мінімуму питомих витрат на одиницю залишкового ресурсу.

Розроблений технічний критерій K поєднаємо з економічною моделлю. Тоді можна використовувати двокритеріальний підхід:

1. Технічна ефективність

$$K_i = \frac{L_{res,i}}{\Delta D_i \cdot I_{wear,i}} \cdot \frac{1}{\delta_f}. \quad (14)$$

2. Економічна ефективність

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$E_i = \frac{C_i}{L_{res,i}}. \quad (15)$$

Рациональним вважається спосіб, для якого: K_i – максимальне; E_i – мінімальне.

Розглянемо три способи відновлення: стандартне перепрофілювання, часткове перепрофілювання і наплавлення і прийнемо основні показники для розрахунку основного економічного показника (табл. 1).

Таблиця 1. – Вхідні показники для розрахунку основного економічного показника

Показник	Стандартне обточування	Часткове перепрофілювання	Наплавлення
C_{lab} , грн	1200	1400	2200
C_{eq} , грн	800	900	1500
C_{mat} , грн	100	150	1800
C_{en} , грн	250	300	600
ΔD , мм	8	5	2
c_D , грн/мм	500	500	500
T , год	3	4	8
c_t , грн/год	400	400	400
I_{wear} , мм/1000 км	0,025	0,020	0,015
L_{res} , тис. км	120	140	180
p_i	0,03	0,04	0,08
C_{rep} , грн	12000	12000	12000
c_w , грн/(мм)	20000	20000	20000

Розрахунок питомих витрат економічної моделі для трьох способів відновлення коліс показано в табл. 2.

Таблиця 2. – Питомі витрати основних видів відновлення коліс

Спосіб відновлення	Сукупні витрати, грн	Залишковий ресурс, км	Питомі витрати, грн/км
Стандартне обточування	67 910	120 000	0,566
Часткове перепрофілювання	63 330	140 000	0,452
Наплавлення	65 260	180 000	0,363

Запропонована методика повинна реалізовуватись у такій послідовності:

1. Вимірювання геометричних параметрів колеса (товщина гребеня, діаметр).
2. Визначення ступеня підрізу гребеня δ_f .
3. Розрахунок можливого зменшення діаметра ΔD для кожного способу відновлення.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

4. Оцінка інтенсивності подальшого зносу I_{wear} .
5. Визначення залишкового ресурсу L_{res} .
6. Обчислення критерію K для кожного варіанта.
7. Вибір способу відновлення, що забезпечує максимальне значення K .

Методика дозволяє враховувати реальний стан колеса, а не лише нормативні параметри, оцінювати доцільність переходу від перепрофілювання до наплавлення, прогнозувати ефективність відновлення з урахуванням експлуатаційних умов. Запропонований підхід може бути використаний як основа для розроблення систем підтримки прийняття рішень у депо та ремонтних підприємствах.

Результати розрахунків показали, що при значному підрізі гребеня найменше значення питомих витрат має відновлення гребеня наплавленням, незважаючи на вищі прямі витрати. Це пояснюється мінімальними втратами металу та найбільшим залишковим ресурсом. Таким чином, економічна модель підтверджує доцільність використання наплавлення при значному зносі гребеня, тоді як традиційне перепрофілювання є доцільним лише за малих значень підрізу (рис. 3).

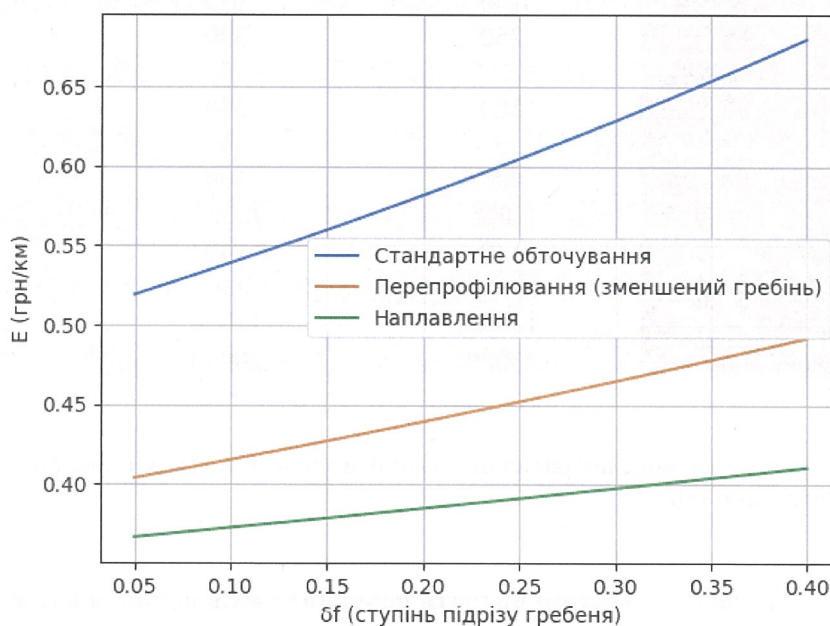


Рис. 3. Залежність критерію ефективності K від ступеня підрізу гребеня δ_f для різних способів відновлення коліс

З рис. 3 видно, що зі збільшенням ступеня підрізу гребеня δ_f значення критерію ефективності K зменшується для всіх способів відновлення. Найбільш різке зниження характерне для стандартного перепрофілювання, що обумовлено значними втратами металу. Метод часткового перепрофілювання демонструє помірну залежність, тоді як наплавлення забезпечує найвищі значення критерію ефективності та найменшу чутливість до зростання зносу.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Після визначення чисельних значень ступеня підрізу гребеня розроблено карту рішень (рис. 4), на якій зображені раціональні області відновлення з граничними ступеня підрізу гребеня колеса.

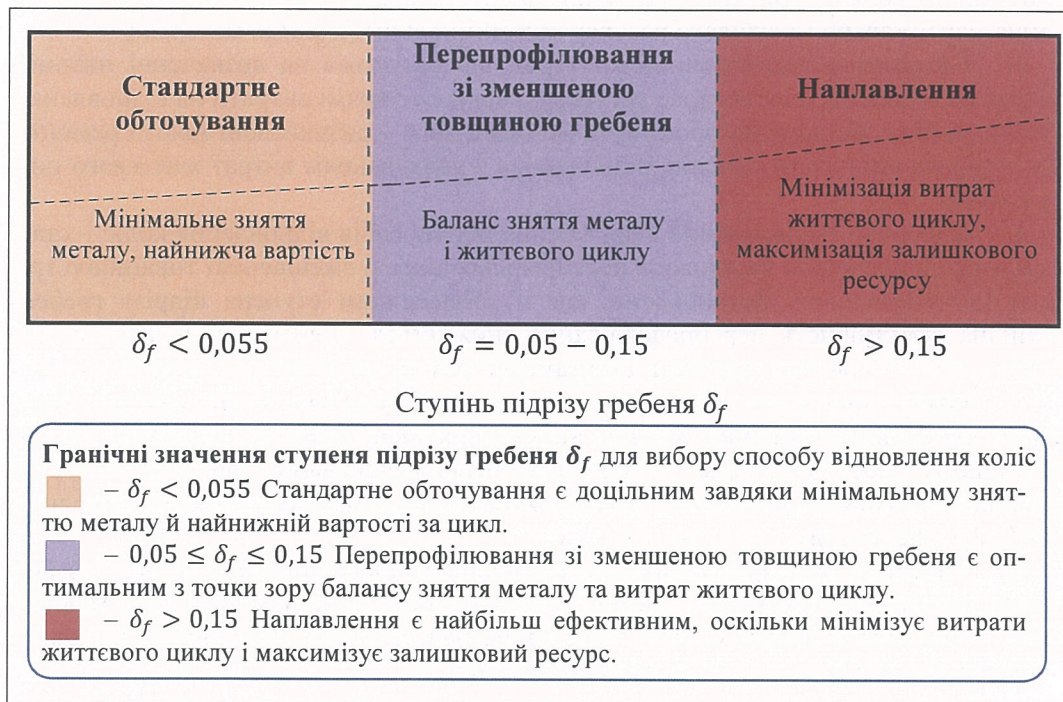


Рис. 4. Карта рішень для основних видів відновлення коліс

Отримана карта рішень показує, що ефективність способу відновлення не є сталою, а суттєво залежить від ступеня зносу гребеня. При цьому традиційні технології, які є ефективними при незначному зносі, втрачають свою доцільність при переході до наднормативного рівня зносу. Запропонована карта рішень дозволяє: формалізувати процес вибору способу відновлення; враховувати як технічні, так і економічні фактори; визначати межі раціонального застосування різних технологій; мінімізувати втрати металу та витрати життєвого циклу.

На відміну від існуючих підходів, запропонована карта рішень базується на інтегральному техніко-економічному критерії та дозволяє перейти від вибору окремої технології до обґрунтованого вибору раціонального способу відновлення залежно від ступеня зносу гребеня.

Висновки. У роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу обґрунтування вибору способу відновлення коліс залізничного рухомого складу при наднормативному зносі гребеня на основі техніко-економічного підходу.

1. Проведено аналіз сучасних наукових досліджень, який показав, що існуючі роботи зосереджені переважно на дослідженні механізмів зносу, динаміки взаємодії «колесо–рейка», прогнозуванні зносу та розробленні окремих технологій відновлення коліс. Встановлено, що питання комплексного обґрунтування вибору способу відновлення при наднормативному зносі гребеня на основі інтегрального техніко-економічного критерію залишається недостатньо дослідженим.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

2. Розроблено технічний критерій ефективності відновлення коліс, який враховує залишковий ресурс, втрати металу внаслідок зменшення діаметра колеса, інтенсивність подальшого зносу та ступінь підрізу гребеня. Запропонований критерій дозволяє оцінювати ефективність способів відновлення з позиції забезпечення максимально можливого ресурсу при мінімальних втратах матеріалу.

3. Сформовано економічний критерій, що базується на визначенні питомих витрат на одиницю залишкового ресурсу та враховує прямі витрати на відновлення, втрати металу, витрати на простій, подальший знос і ризики повторного ремонту. Це дозволяє оцінювати способи відновлення з урахуванням витрат життєвого циклу колеса.

4. Виконано порівняльний аналіз основних способів відновлення коліс – стандартного відновлення, часткового перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня та наплавлення. Встановлено, що зі збільшенням ступеня підрізу гребеня технічна ефективність перепрофілювання знижується, а економічні витрати зростають, що обумовлено значними втратами металу та скороченням ресурсу колеса.

5. Розроблено карту рішень, яка визначає раціональні області застосування різних способів відновлення залежно від ступеня зносу гребеня. Показано, що при незначному зносі доцільним є стандартне перепрофілювання, при середньому – перепрофілювання зі зменшеною товщиною гребеня, а при наднормативному зносі найбільш ефективним є наплавлення.

6. Доведено, що використання техніко-економічного критерію дозволяє забезпечити оптимальне поєднання технічної ефективності та економічної доцільності, а також мінімізувати втрати металу і витрати на експлуатацію коліс рухомого складу.

Отримані результати можуть бути використані:

- у вагонних та локомотивних депо для обґрунтованого вибору способу відновлення коліс залежно від ступеня їх зносу;
- на ремонтних підприємствах при плануванні технологічних процесів відновлення колісних пар;
- у системах технічної діагностики та моніторингу стану коліс для автоматизації прийняття рішень щодо ремонту;
- при розробленні нормативних документів та рекомендацій щодо допустимих меж зносу та раціональних способів відновлення;
- у наукових дослідженнях, спрямованих на подальше вдосконалення моделей зносу та оптимізації життєвого циклу коліс.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення граничних значень ступеня зносу гребеня для переходу між способами відновлення, врахування динаміки взаємодії «колесо–рейка» у критеріях ефективності, а також інтеграцію запропонованого підходу з системами цифрового моніторингу стану рухомого складу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П., Зуб Є.П. Ресурсозбереження при відновленні коліс рухомого складу залізниць. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Северодонецьк: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2017. № 3 (233). С. 183–189. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VJSUNU_2017_3_36
2. Andrade A. R., Stow J. Assessing the potential cost savings of introducing the maintenance option of economic tyre returning in Great Britain railway wheelsets. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 168. P. 317–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.05.033>

3. Coo B. C., Lee V.J. Railway vehicle wheel restoration by submerged arc welding and its characterization. *Surfaces*. 2020. 1(52), 250–263. DOI: <https://doi.org/10.3390/sci1020052>
4. Muhamedsalih Y., Bevan A., Stow J. Wheel wear and rail damage prediction for wheels turned with thin flanges. In *Proceedings of the 11th World Congress on Railway Research*. 2016. Milan, Italy. University of Huddersfield Repository.
5. Muhamedsalih Y., Stow J., Bevan A. Use of railway wheel wear and damage prediction tools to improve maintenance efficiency through the use of economic tyre returning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 233. Iss. 1. P. 590–602. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718781127>
6. Muhamedsalih Y., Tucker G., Stow J. Optimisation of wheelset maintenance by using a reduced flange wear wheel profile. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023. Vol. 237 Iss. 3. P. 309–324. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097221105959>
7. Pires A. C., Pacheco L. A., Braghin F., Silva M. M., Santos G. F. The effect of railway wheel wear on reprofiling and service life. *Wear*. 2021. 477, Article 203798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203799>
8. Tao G., Wang K., Ren D., Wen Z., Jin X., Li Z., Wang H., Liu Q. Understanding and treatment of severe flange wear of metro train wheels. *Vehicle System Dynamics*, 2023. 61(9). P. 2415–2438. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2117057>
9. Wang D., Yan X., Wang K., Zhu M., Li Z. Analysis of the wear performance of thin flange wheel for high-speed trains. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. 77(6), P. 971–983. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2024-0401>
10. Zhu Y., Yang Y., Mu X., Wang W., Lewis R. Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels. *Wear*, 2019. Vol. 430–431. Article 202946. P. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>
11. Magel E., Kalousek J., Caldwell R. A numerical simulation of wheel wear. *Wear*. 2005. Vol. 258. Iss. 7-8. P. 1245–1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.033>
12. Ekberg A. Kabo, E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. *Wear*. 2005. Vol. 258. Iss. 7-8. P. 1288–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039>
13. Magel E., Kalousek J. 2017. Designing and assessing wheel/rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Iss. 7. P. 805–818. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717708079>
14. Lewis R., Olofsson U. Wheel–rail interface handbook (2nd ed.). *Woodhead Publishing*. 2019. 842 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/widfio>
15. Innocenti A., Marini L., Meli E., Pallini G. Rindi A. Development of a wear model for the analysis of complex railway networks. *Wear*. 2014. Vol. 309. Iss. 1-2. P. 174–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.010>
16. Ringsberg J. W. Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation and propagation in railway wheels. *International Journal of Fatigue*. 2001. Vol. 23. Iss. 7. P. 575–586. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00024-X)
17. Luczak B., Firlik B., Staśkiewicz T., Sumelka W. Numerical algorithm for predicting wheel flange wear in trams – validation in a curved track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020. Vol. 234 Iss. 10. P. 1156–1169. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719882807>
18. Saponova S., Tkachenko V., Braikovska N., Zub Y. Scientific approach to the methods of increasing the lifecycle of wheels of railway vehicles. *Transport Systems and Technologies*. 2021. Iss. 38. P. 164–172. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-161-15>
19. Bosso N., Gugliotta A., Abeidi A. S. Influence of wheel and rail profiles on rail vehicle dynamics and wear behaviour. *Vehicle System Dynamics*. 2018. Vol. 13. No. 6. P. 3540–3549. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1589536>

S. Yu. Saponova

National Transport University,
Omelianovycha-Pavlenka str. 1, 01010, Kyiv, Ukraine
Tel.: +380505834854, E-mail: doc.saponova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

O. V. Vorobiov

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
17 Ioanna Pavla II Str., Kyiv, 01042, Ukraine
Tel.: +380500527950, E-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6546-4434>

A TECHNICAL-ECONOMIC APPROACH TO SELECTING WHEEL RESTORATION METHODS FOR RAILWAY ROLLING STOCK UNDER FLANGE WEAR BEYOND ALLOWABLE LIMITS

The purpose of this study is to justify the selection of a wheel restoration method for railway rolling stock under flange wear beyond allowable limits based on a technical-economic criterion that considers both technical efficiency and life cycle costs.

The study is based on an analytical approach combining recent research in economic reprofiling, wheel profile optimization, local restoration by welding, and diagnostics of flange wear mechanisms. An integral technical criterion is proposed, taking into account flange wear, wheel diameter reduction, wear intensity, and residual life after restoration. In addition, an economic criterion based on specific life cycle costs per unit of residual life is developed.

A comparative analysis of three restoration methods – standard reprofiling, reduced flange reprofiling, and welding – is performed. The dependencies of technical and economic criteria on flange wear are obtained, and a decision map defining rational application areas for each method is developed. It is shown that with increasing flange wear, the efficiency of conventional reprofiling decreases due to excessive material removal and reduced wheel life. Welding is found to be the most effective method under flange wear beyond allowable limits, ensuring the best balance between technical performance and economic efficiency.

A technical-economic approach to selecting wheel restoration methods under flange wear beyond allowable limits is proposed, integrating an efficiency criterion, an economic model, and a decision map.

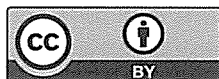
The results can be applied in railway depots, maintenance facilities, and repair enterprises, as well as in the development of guidelines and standards for rational wheel restoration.

Keywords: railway transport, railway wheel, flange wear beyond allowable limits, reprofiling, surfacing, decision-making criterion.

REFERENCES

1. Saponova, S. Yu., Tkachenko, V. P., & Zub, Ye. P. (2017). Resursozberezhennya pry vidnovlenni kolis rukhomoho skladu zaliznyts'. [Resource saving at restoring of railway rolling stock wheels]. *Visnyk Shkhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu im. V. Dalya. – Scientific journals of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3(233), 183–189. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2017_3_36
2. Andrade, A. R., & Stow, J. (2017). Assessing the potential cost savings of introducing the maintenance option of economic tyre turning in Great Britain railway wheelsets. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 317–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.05.033>

3. Co0, B. C., & Lee, D. (2020). Railway vehicle wheel restoration by submerged arc welding and its characterization. *Surfaces*, 1(52), 250–263. DOI: <https://doi.org/10.3390/sci1020052>
4. Muhamedsalih, Y., Bevan, A., & Stow, J. (2016). Wheel wear and rail damage prediction for wheels turned with thin flanges. In *Proceedings of the 11th World Congress on Railway Research*, Milan, Italy. University of Huddersfield Repository.
5. Muhamedsalih, Y., Stow, J., & Bevan, A. (2019). Use of railway wheel wear and damage prediction tools to improve maintenance efficiency through the use of economic tyre turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(1), 590–602. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718781127>
6. Muhamedsalih, Y., Tucker, G., & Stow, J. (2023). Optimisation of wheelset maintenance by using a reduced flange wear wheel profile. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 237(3), 309–324. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097221105959>
7. Pires, A. C., Pacheco, L. A., Braghin, F., Silva, M. M., & Santos, G. F. (2021). The effect of railway wheel wear on reprofiling and service life. *Wear*, 477, Article 203798, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203799>
8. Tao, G., Wang, K., Ren, D., Wen, Z., Jin, X., Li, Z., Wang, H., & Liu, Q. (2023). Understanding and treatment of severe flange wear of metro train wheels. *Vehicle System Dynamics*, 61(9), 2415–2438. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2117057>
9. Wang, D., Yan, X., Wang, K., Zhu, M., & Li, Z. (2025). Analysis of the wear performance of thin flange wheel for high-speed trains. *Industrial Lubrication and Tribology*, 77(6), 971–983. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2024-0401>
10. Zhu, Y., Yang, Y., Mu, X., Wang, W., & Lewis, R. (2019). Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels. *Wear*, 430–431, Article 202946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>
11. Magel, E., Kalousek, J., & Caldwell, R. (2005). A numerical simulation of wheel wear. *Wear*, 258(7-8), 1245–1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.033>
12. Ekberg, A., & Kabo, E. (2005). Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. *Wear*, 258(7-8), 1288–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039>
13. Magel, E., & Kalousek, J. (2017). Designing and assessing wheel/rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(7), 805–818. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717708079>
14. Lewis, R., & Olofsson, U. (2019). Wheel–rail interface handbook (2nd ed.). *Woodhead Publishing*. 842. Retrieved from: <https://surl.li/widfio>
15. Innocenti, A., Marini, L., Meli, E., Pallini, G. & Rindi, A. (2014). Development of a wear model for the analysis of complex railway networks. *Wear*, 309, 1-2, 174–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.010>
16. Ringsberg, J. W. (2001). Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation and propagation in railway wheels. *International Journal of Fatigue*, 23, 7, 575–586. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00024-X)
17. Luczak, B., Firlik, B., Staškiewicz, T., & Sumelka, W. (2020). Numerical algorithm for predicting wheel flange wear in trams – validation in a curved track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 234(10), 1156–1169. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719882807>
18. Saponova, S., Tkachenko, V., Braikovska, N., & Zub, Y. (2021). Naukovyi pidkhdid do metodiv zbilshennia zhyttievoho tsykladu kolisnykh par rukhomoho skladu zaliznyts. [Scientific approach to the methods of increasing the life cycle of wheels of railway vehicles]. *Transportni systemy ta tekhnolohii – Transport Systems and Technologies*, 38, 164–172. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-161-15>
19. Bosso N., Gugliotta A., & Abeidi A. S. (2018). Influence of wheel and rail profiles on rail vehicle dynamics and wear behaviour. *Vehicle System Dynamics*. 13(6), 3540–3549. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1589536>



Стаття надійшла 17.04.2026

Стаття прийнята 22.04.2026

Опубліковано 29.05.2026