

УДК 629.463.027.27-048.35

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Доктори техн. наук О. М. Сафронов, Ю. Є. Калабухін,
канд. техн. наук А. О. Бабенко

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF BRAKE SHOES FOR PASSENGER RAILWAY VEHICLES

Dr. Sc. (Tech.) O. M. Safronov, Dr. Sc. (Tech.) Yu. E. Kalabukhin,
PhD (Tech.) A. O. Babenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371396>



Анотація. У статті розглянуто питання підвищення ефективності гальмових систем залізничного рухомого складу на основі аналізу конструктивних, триботехнічних, теплотехнічних і техніко-економічних характеристик сучасних гальмових колодок. Проведено порівняльне оцінювання чавунних, фосфористих, композиційних і металокерамічних колодок, визначено їхні основні переваги, недоліки та сфери доцільного застосування.

Результати дослідження показали, що використання композиційних гальмових колодок сприяє підвищенню коефіцієнта тертя, зменшенню необхідного натискання на 20–30 %, збільшенню ресурсу роботи у три-п'ять разів і зниженню експлуатаційних витрат порівняно з чавунними. Водночас нижча теплопровідність композиційних матеріалів зумовлює підвищення температури поверхні кочення колеса та збільшує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень колісних пар. Показано, що застосування композиційних гальмових колодок є доцільним за умови врахування особливостей їх експлуатації і теплового навантаження на колісні пари.

Ключові слова: залізничний транспорт, рухомий склад, пасажирські вагони, гальмова система, гальмові колодки, автоматичні гальма, безпека руху, транспортна механіка, система контролю, пневматичний циліндр, важільна передача, техніко-економічний аналіз.

Abstract. The paper addresses the problem of improving the efficiency of railway rolling stock braking systems through a comprehensive analysis of the design, tribological, thermal, operational, and economic characteristics of modern brake blocks. The performance of the braking system is largely determined by the frictional properties of brake blocks, which directly affect braking efficiency, braking distance, wheel wear, maintenance costs, and the overall operational safety of railway vehicles. The increasing axle loads, higher train speeds, and more demanding operating conditions require the development and application of friction materials capable of maintaining stable braking performance under a wide range of service conditions.

A comparative analysis of cast iron, high-phosphorus cast iron, composite, and sintered metal brake blocks was carried out. Their structural features, frictional properties, thermal behavior, durability, advantages, disadvantages, and fields of practical application were evaluated. Particular attention was paid to the comparison of traditional cast iron brake blocks with modern composite

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Сафронов О. М., Калабухін Ю. Є., Бабенко А. О., 2026.

brake blocks, which have become widely used in freight and passenger rolling stock due to their improved wear resistance, lower weight, and higher friction coefficient.

A comprehensive approach for evaluating the operational efficiency of railway brake blocks is proposed. Unlike conventional methods, which mainly focus on separate tribological characteristics, the proposed approach simultaneously considers the coefficient of friction, wear resistance, thermal conductivity, required application force, brake cylinder pressure, loading of brake rigging components, compressed air consumption, service life, purchase cost, maintenance costs, and overall economic efficiency. Such an integrated assessment makes it possible to determine the rational application area of each brake block type depending on operating conditions and technical requirements.

The study has shown that composite brake blocks provide a friction coefficient approximately 20-40 % higher than that of conventional cast iron brake blocks, allowing the required braking force to be achieved with a 20-30 % lower application force. As a result, the load acting on the brake rigging, brake cylinder, and pneumatic braking equipment is reduced, while compressed air consumption and maintenance costs decrease. Furthermore, the service life of composite brake blocks exceeds that of cast iron blocks by approximately three to five times, leading to lower life-cycle operating costs despite their higher initial purchase price.

At the same time, the lower thermal conductivity of composite friction materials results in increased temperatures at the wheel-brake block contact interface. This phenomenon raises the probability of thermal defects, wheel tread damage, and thermomechanical deterioration of wheelsets during intensive braking. Therefore, when selecting brake block materials, both braking efficiency and thermal loading of wheelsets should be considered. The obtained results can serve as a scientific basis for selecting brake block materials during the design, modernization, and operation of railway braking systems and may contribute to improving operational reliability, reducing maintenance costs, and increasing traffic safety.

Keywords: railway transport, rolling stock, passenger railway vehicles, braking system, brake shoes, automatic brakes, traffic safety, transport mechanics, control system, pneumatic cylinder, brake rigging, techno-economic analysis.

Вступ. Ефективність функціонування гальмової системи є одним із визначальних чинників гарантування безпеки руху, надійності та економічності експлуатації залізничного рухомого складу [1-5]. Зростання швидкостей руху поїздів, збільшення осьових навантажень і підвищення інтенсивності перевезень зумовлюють необхідність постійного вдосконалення елементів гальмових систем, серед яких особливе місце займають гальмові колодки. Саме від їхньої конструкції, матеріалу виготовлення і триботехнічних властивостей залежать ефективність реалізації гальмового зусилля, довговічність колісних пар, надійність роботи гальмового обладнання та рівень експлуатаційних витрат [6-10].

Традиційно на залізничному транспорті застосовували чавунні гальмові колодки, для яких характерні висока теплопровідність, стабільна робота в різних кліматичних умовах і відносна простота виготовлення. Проте їхніми суттєвими недоліками є підвищене зношування, значна маса та зниження коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості руху. Для підвищення ефективності гальмування останнім часом широкого застосування набули композиційні гальмові колодки, що забезпечують вищий коефіцієнт тертя, більший ресурс роботи, меншу масу та зниження експлуатаційних витрат [7, 9, 11].

Разом із тим їх використання супроводжено підвищеним тепловим навантаженням на поверхню кочення коліс, що може призводити до утворення

термомеханічних дефектів і впливати на довговічність колісних пар.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що більшість робіт присвячена вивченню триботехнічних властивостей фрикційних матеріалів, процесів тепловиділення, інтенсивності зношування гальмових колодок і коліс, а також удосконаленню конструкції фрикційних елементів. Водночас недостатньо дослідженим залишається комплексне оцінювання впливу типу гальмової колодки на параметри роботи гальмової системи, зокрема на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі, витрати стисненого повітря і техніко-економічні показники експлуатації рухомого складу.

Через це актуальним є проведення комплексного порівняльного аналізу конструктивних, триботехнічних, теплотехнічних та економічних характеристик різних типів гальмових колодок, спрямованого на обґрунтування їх раціонального вибору з урахуванням вимог щодо ефективності гальмування, надійності та експлуатаційної ефективності залізничного рухомого складу [1, 3, 4, 9]. Результати такого аналізу можуть бути використані як науково обґрунтована основа для вибору раціонального типу гальмових колодок залежно від умов експлуатації, що сприятиме підвищенню безпеки руху, зменшенню експлуатаційних витрат і збільшенню ресурсу елементів гальмового обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі залізничного транспорту свідчать, що підвищення ефективності гальмових систем нерозривно пов'язане з удосконаленням фрикційних матеріалів гальмових колодок. У наукових працях розглянуто питання формування стабільного коефіцієнта тертя, підвищення ресурсу роботи колодок, зменшення інтенсивності зношування колісних пар, забезпечення теплової стійкості та зниження експлуатаційних

витрат. Водночас результати окремих досліджень свідчать про необхідність комплексного оцінювання не лише триботехнічних характеристик колодок, а і їхнього впливу на роботу гальмової системи в цілому.

Експлуатаційні складові економіко-технологічних станів життєвого циклу пасажирських вагонів і їхній вплив на ефективність експлуатації і технічного обслуговування рухомого складу досліджено в роботі [12]. Автори дослідили закономірності формування експлуатаційних витрат, показників надійності та технічного стану рухомого складу на різних етапах життєвого циклу. Надано підхід для оцінювання економічної ефективності експлуатації вагонів із урахуванням витрат на технічне обслуговування, ремонт і модернізацію.

Результати роботи свідчать, що оптимізація технічного стану окремих вузлів і систем рухомого складу є одним із основних чинників зменшення експлуатаційних витрат і підвищення ефективності використання вагонного парку. Разом із тим дослідження має загальний характер і не містить аналізу впливу різних типів гальмових колодок на технічні та економічні показники роботи гальмової системи.

Особливості розподілу сили натискання між гальмовими колодками вантажних вагонів залежно від конструкції гальмової важільної передачі досліджено у праці [13]. Автори виконали математичне моделювання процесу передавання гальмового зусилля та визначили оптимальні параметри розподілу навантаження між окремими колодками з метою забезпечення рівномірного зношування і підвищення ефективності гальмування.

Результати дослідження свідчать, що раціональний розподіл сили натискання дає змогу підвищити рівномірність роботи гальмової системи, зменшити локальні перевантаження елементів важільної передачі та збільшити ресурс гальмових

колодок. Разом із тим у роботі не розглянуто вплив матеріалу гальмової колодки на величину необхідного натискання і техніко-економічні показники експлуатації, що обумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

У роботі [14] досліджено триботехнічні характеристики чавунних, композиційних і металокерамічних гальмових колодок під час експлуатації за різних температур навколишнього середовища. Автори виконали експериментальні випробування коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування і температурного режиму роботи колодок.

Встановлено, що композиційні матеріали мають більш стабільні фрикційні властивості порівняно з чавунними, однак їхня ефективність знижується за від'ємних температур через зміну властивостей поверхневого шару матеріалу. Робота присвячена дослідженню триботехнічних процесів і не розглядає вплив типу колодок на роботу пневматичної гальмової системи.

У роботі [15] досліджено експлуатаційні, триботехнічні і теплотехнічні характеристики чавунних і композиційних гальмових колодок із чавунними вставками, призначених для залізничного рухомого складу. Автори порівняли і проаналізували фізико-механічні властивості фрикційних матеріалів, особливості їхньої взаємодії з поверхнею кочення колеса, а також оцінили вплив матеріалу колодки на інтенсивність тепловиділення, зношування та довговічність елементів гальмової системи.

У результаті дослідження встановлено, що композиційні колодки забезпечують вищий коефіцієнт тертя, менший рівень шуму та значно більший ресурс роботи порівняно з чавунними. Водночас через нижчу теплопровідність композиційних матеріалів у зоні контакту «колодка–коесо» формується більш висока температура, що може спричиняти термічні пошкодження поверхні кочення коліс. Автори також зазначили, що застосування

чавунних вставок покращує відведення теплоти, однак повністю не усуває зазначених недоліків композиційних матеріалів.

Разом із тим дослідження зосереджене переважно на матеріалознавчих і триботехнічних аспектах роботи гальмових колодок і не містить комплексного техніко-економічного оцінювання їх застосування з урахуванням вартості, ресурсу, необхідного натискання і впливу на експлуатаційні витрати рухомого складу. Саме ці питання розглянуто в цій статті.

У роботі [16] досліджено закономірності зношування гальмових колодок модернізованої гальмової системи вантажних вагонів. Для прогнозування інтенсивності зношування автори застосували моделі часових рядів ARIMA, що дало змогу визначити зміну технічного стану колодок залежно від умов експлуатації.

Отримані результати свідчать, що використання статистичних моделей забезпечує достатню точність прогнозування ресурсу гальмових колодок і допомагає своєчасно планувати їх заміну. Разом із тим у дослідженні основну увагу приділено прогнозуванню процесу зношування без комплексного врахування триботехнічних, теплотехнічних та економічних характеристик різних типів гальмових колодок, що і стало предметом дослідження в цій статті.

У роботі [17] комплексно проаналізовано сучасні конструкції колодкових гальм залізничного транспорту і досліджено вплив матеріалу колодок на рівень шуму, тепловий стан коліс і зношування поверхні кочення.

Автори показали, що використання композиційних колодок дає змогу суттєво зменшити шум під час гальмування, однак спостерігають підвищення температури колеса через низьку теплопровідність матеріалу. Дослідження має оглядовий характер і не містить математичного моделювання роботи гальмової системи.

У роботі [18] досліджено вплив нерівномірного навантаження гальмових колодок на напружено-деформований стан елементів візка вантажного вагона. Автори побудували математичну модель взаємодії гальмової колодки з колесом і визначили характер зміни напружень для різних схем прикладання гальмового зусилля.

Результати дослідження показали, що нерівномірне натискання колодок призводить до підвищення локальних напружень, нерівномірного зношування фрикційних елементів і погіршення ефективності роботи гальмової системи. Водночас дослідження зосереджене переважно на міцності конструкції візка і не містить порівняльної оцінки експлуатаційних властивостей різних матеріалів гальмових колодок.

У роботі [19] досліджено вплив обмерзання композиційних гальмових колодок на ефективність гальмування вантажних поїздів.

Автори встановили, що утворення льоду на поверхні композиційних колодок призводить до зменшення коефіцієнта тертя і збільшення гальмового шляху. Запропоновано рекомендації з періодичного службового пригальмовування для видалення льоду.

У роботі [20] проаналізовано експлуатаційні проблеми використання композиційних гальмових колодок на вантажних вагонах європейських залізниць.

Автори відзначають високу довговічність композиційних матеріалів, зниження шуму та експлуатаційних витрат, але звертають увагу на проблему перегрівання коліс і збільшення гальмового шляху за несприятливих погодних умов. Питання впливу матеріалу колодок на параметри роботи пневматичної гальмової системи залишилися поза межами дослідження.

Мета дослідження. Метою роботи є проведення комплексного аналізу конструкцій та експлуатаційних характеристик сучасних гальмових колодок

залізничного рухомого складу, оцінювання їхніх триботехнічних, теплотехнічних і техніко-економічних показників, а також визначення впливу матеріалу гальмової колодки на ефективність реалізації гальмового зусилля, навантаження на елементи гальмової системи та експлуатаційні витрати рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- виконати порівняльний аналіз триботехнічних характеристик різних типів гальмових колодок, зокрема коефіцієнта тертя, зносостійкості, теплостійкості та впливу температурних режимів на ефективність процесу гальмування;

- оцінити вплив матеріалу гальмових колодок на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі та витрати стисненого повітря під час гальмування;

- провести техніко-економічне порівняння чавунних і композиційних гальмових колодок з урахуванням їхньої вартості, ресурсу роботи, періодичності заміни та впливу на експлуатаційні витрати рухомого складу.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні методичного підходу щодо комплексного оцінювання ефективності застосування гальмових колодок залізничного рухомого складу, який, на відміну від існуючих, передбачає одночасне врахування триботехнічних, теплотехнічних, експлуатаційних і техніко-економічних показників, а також впливу матеріалу гальмової колодки на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі та витрати стисненого повітря, щоб більш обґрунтовано вибирати тип гальмових колодок залежно від умов експлуатації рухомого складу.

Основна частина дослідження. Гальмові колодки є одним з основних елементів фрикційного вузла гальмової

системи рухомого складу. Вони забезпечують перетворення кінетичної енергії поїзда в теплову енергію через виникнення сил тертя між поверхнею колеса (або гальмового диска) і робочою поверхнею колодки. Від конструкції, матеріалу виготовлення та триботехнічних характеристик гальмових колодок значною мірою залежать ефективність реалізації гальмового зусилля, величина гальмового шляху, інтенсивність зношування елементів гальмової системи, експлуатаційна надійність залізничного рухомого складу та безпека руху поїздів.

Сучасні тенденції розвитку залізничного транспорту, пов'язані зі збільшенням швидкостей руху, осьових навантажень і маси поїздів, зумовлюють необхідність підвищення ефективності та надійності роботи гальмових систем, насамперед через удосконалення фрикційних матеріалів гальмових колодок. У процесі гальмування поверхня контакту між колодкою та колесом зазнає значних механічних і теплових навантажень, тому матеріал колодки має забезпечувати стабільні триботехнічні характеристики незалежно від режиму роботи та зовнішніх умов експлуатації [21].

До основних експлуатаційних вимог, які висувають щодо гальмових колодок, належать забезпечення стабільного коефіцієнта тертя в широкому діапазоні швидкостей руху та сил натискання, висока зносостійкість, здатність працювати за тривалих і повторних гальмувань без істотного погіршення фрикційних властивостей, ефективне відведення теплоти із зони контакту і мінімальний

негативний вплив на поверхню кочення коліс або гальмових дисків. Водночас матеріал колодки має бути стійким до дії атмосферних чинників, зокрема вологи, снігу та низьких температур, не утворювати продуктів зношування, що погіршують умови контакту колеса з рейкою, не містити токсичних компонентів і забезпечувати простоту монтажу та заміни під час технічного обслуговування.

Вибір матеріалу гальмових колодок є результатом компромісу між високими фрикційними властивостями, теплостійкістю, довговічністю, технологічністю виготовлення та економічною доцільністю застосування. Підвищення коефіцієнта тертя зазвичай супроводжено збільшенням теплового навантаження на поверхню колеса, тоді як покращення теплопровідності матеріалу може призводити до погіршення інших експлуатаційних характеристик. Отже, удосконалення конструкції та експлуатаційних властивостей гальмових колодок є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних гальмових систем залізничного рухомого складу [22].

Гальмові колодки, що використовують на залізничному транспорті, класифікують за матеріалом виготовлення на чавунні, чавунні з підвищеним вмістом фосфору, композиційні та металокерамічні. Крім того, залежно від конструктивного виконання використовують безгребеневі, гребеневі, секційні та комбіновані конструкції, а для дискових гальм застосовують спеціальні гальмові накладки. На пасажирських вагонах застосовують чавунні та композиційні колодки (рис. 1).

а



б



Рис. 1. Чавунна (а) і композиційна (б) гальмова колодка

Кожен із зазначених типів має власні конструктивні особливості, переваги, недоліки та раціональну сферу використання, що визначено умовами експлуатації рухомого складу.

Чавунні гальмові колодки

Чавунні гальмові колодки є традиційним типом фрикційних елементів, які протягом тривалого часу застосовують на локомотивах і пасажирських вагонах із конструкційною швидкістю до 120 км/год [23]. Їх широке використання зумовлене відносною простотою виготовлення, високою теплопровідністю, ефективним відведенням теплоти із зони тертя і задовільною роботою за несприятливих погодних умов. На відміну від більшості композиційних матеріалів, коефіцієнт тертя чавуну не зазнає різких змін із дією вологи, що позитивно впливає на стабільність гальмування під час експлуатації в дощову або снігову погоду [24].

Разом із тим експлуатація чавунних колодок виявила низку суттєвих недоліків. Найбільш істотним із них є виражена залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання, унаслідок чого зі збільшенням швидкості руху ефективність реалізації гальмового зусилля поступово зменшується. Для компенсації цього явища на високошвидкісному рухомому складі виникає необхідність застосування автоматичних регуляторів сили натискання колодок, які забезпечують підтримання необхідної гальмової ефективності в широкому діапазоні швидкостей. Також на пасажирських вагонах 03-ВМ R1C встановлюють протиюзові пристрої, що запобігають заклиненню колісних пар, але ускладнюють гальмове обладнання пасажирського вагона та підвищують витрати стисненого повітря [25-27].

Ще одним недоліком чавунних колодок є відносно висока інтенсивність їх зношування. Це призводить до збільшення обсягів технічного обслуговування, частішої заміни колодок, необхідності регулювання важільної передачі та

зростання експлуатаційних витрат. Крім економічних аспектів, інтенсивне зношування негативно впливає на стабільність гальмових характеристик протягом міжремонтного періоду.

Отже, незважаючи на високу надійність, добру теплопровідність і простоту конструкції, застосування чавунних гальмових колодок найбільш доцільне на рухомому складі із середніми швидкостями експлуатації. Для сучасних високошвидкісних поїздів їх використання є обмеженим через недостатню стабільність фрикційних характеристик, що обумовлює необхідність пошуку та впровадження більш ефективних фрикційних матеріалів.

Композиційні гальмові колодки

Перехід від традиційних чавунних до композиційних гальмових колодок став одним із найважливіших напрямів розвитку гальмових систем залізничного рухомого складу. Основною передумовою їх широкого впровадження стало зростання швидкостей руху поїздів, збільшення осьових навантажень і необхідність підвищення ефективності гальмування з одночасним зменшенням експлуатаційних витрат. На відміну від чавунних аналогів, композиційні матеріали мають більш стабільні триботехнічні властивості, підвищену зносостійкість і меншу масу, що забезпечує покращення техніко-економічних показників гальмових систем.

У сучасному вагонному господарстві композиційні колодки застосовують практично на всіх вантажних вагонах, а також на більшості пасажирських вагонів, конструкційна швидкість яких перевищує 120 км/год. Їх використання дало змогу значно підвищити стабільність реалізації гальмового зусилля в широкому діапазоні швидкостей руху та зменшити залежність коефіцієнта тертя від зміни експлуатаційних умов [23].

Основу композиційних колодок становить багатокомпонентний фрикційний матеріал, до складу якого входять каучукові або полімерні зв'язувальні компоненти,

мінеральні та органічні наповнювачі, армувальні волокна, графіт, технічний вуглець, баритовий концентрат, металеві порошки, модифікатори тертя, інші функціональні добавки. Поєднання компонентів забезпечує формування необхідного комплексу механічних, теплових і триботехнічних властивостей матеріалу залежно від умов експлуатації конкретного виду рухомого складу [24].

Технологічно композиційні колодки виготовляють методом гарячого пресування або вулканізації фрикційної суміші з її подальшим закріпленням на металевому чи сітчасто-дротяному каркасі. Така конструкція забезпечує необхідну механічну міцність, рівномірний розподіл контактних напружень і надійне з'єднання фрикційного матеріалу з несучим елементом.

Однією з основних переваг композиційних колодок є їхня висока зносостійкість. Порівняно з традиційними чавунними колодками строк експлуатації композиційних виробів залежно від умов роботи збільшується у три-п'ять разів. Це дає змогу істотно скоротити періодичність технічного обслуговування, зменшити кількість замін гальмових колодок і знизити витрати на утримання рухомого складу. Додатковою перевагою є значно менша маса композиційних виробів, що позитивно впливає на навантаження елементів гальмової важільної передачі та спрощує виконання ремонтних операцій.

Важливою особливістю композиційних матеріалів є забезпечення більш високого і стабільного коефіцієнта тертя порівняно з чавуном. Завдяки цьому необхідного гальмового зусилля досягають за менших сил натискання колодок, що допомагає зменшити навантаження на елементи важільної передачі, знизити тиск у гальмових циліндрах і скоротити витрати стисненого повітря під час службових та екстрених гальмувань [21]. Крім підвищення енергоефективності пневматичної гальмової системи, це сприяє покращенню керованості поїзда і

підвищенню ефективності роботи автоматичних гальм для багаторазових циклів гальмування.

Суттєвою перевагою композиційних колодок також є нижчий рівень шуму та вібрацій, що виникають у процесі взаємодії колодки з поверхнею кочення колеса [17, 20]. Це покращує акустичний комфорт, зменшує динамічні навантаження на елементи екіпажної частини, сприяє зниженню інтенсивності розвитку втомних пошкоджень окремих деталей гальмової системи.

Під час гальмування кінетична енергія рухомого складу практично повністю перетворюється на теплову енергію, яка виділяється в зоні контакту між гальмовою колодкою та поверхнею кочення колеса. Кількість теплоти, що утворюється в процесі тертя, у першому наближенні може бути визначена за залежністю

$$Q = \mu \cdot N \cdot L, \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється в зоні контакту, Дж;

μ – коефіцієнт тертя між гальмовою колодкою та колесом;

N – сила натискання колодки на колесо, Н;

L – шлях фрикційного контакту колодки з колесом, м.

Із залежності (1) випливає, що кількість теплоти прямо пропорційна коефіцієнту тертя, силі натискання та довжині шляху ковзання. Оскільки композиційні гальмові колодки мають вищий коефіцієнт тертя порівняно з чавунними, то за однакових умов експлуатації в зоні контакту може бути генерована значна кількість теплової енергії. Водночас через нижчу теплопровідність композиційних матеріалів відведення теплоти відбувається менш інтенсивно, що сприяє підвищенню температури поверхні кочення колеса та збільшує ймовірність виникнення термомеханічних дефектів.

Під час вибору матеріалу гальмової колодки необхідно враховувати не лише величину коефіцієнта тертя і ефективність реалізації гальмового зусилля, а і теплові процеси, що виникають у фрикційному контакті, оскільки саме вони значною мірою визначають довговічність колісних пар і надійність роботи гальмової системи.

Крім численних переваг, композиційні колодки мають і певні конструктивні обмеження. Основним недоліком є низька теплопровідність фрикційного матеріалу порівняно з чавуном. У процесі інтенсивного або тривалого гальмування це призводить до накопичення теплоти в зоні

контакту та формування несприятливого температурного режиму на поверхні кочення колеса [22, 24]. Локальний перегрів може спричиняти структурні зміни металу, виникнення термічних напружень і появу характерних експлуатаційних дефектів, серед яких найбільш поширеними є навари металу, пластичні зрушення поверхневого шару, вищербини, термічні тріщини та інші пошкодження (рис. 2). Саме ця обставина обмежує використання композиційних колодок на локомотивах із бандажними колесами, де перегрів може викликати послаблення посадки або навіть сповзання бандажа.

а



б



Рис. 2. Навар (а) і вищербина (б) на поверхні кочення колісних пар у разі роботи з композиційними колодками

Іншим недоліком композиційних матеріалів є підвищена чутливість до впливу атмосферної вологи. У зимовий період під час руху в умовах снігопаду або хуртовини на робочій поверхні колодок може утворюватися льодова кірка, яка тимчасово знижує коефіцієнт тертя і ефективність реалізації гальмового зусилля. Для відновлення нормальної роботи гальмової системи необхідне періодичне службове пригальмовування, яке забезпечує нагрівання та висушування поверхні тертя.

Конструктивне виконання композиційних колодок визначено умовами

їх експлуатації. Найбільшого поширення набули колодки із сітчасто-дротяним каркасом, призначені переважно для вантажних вагонів, і колодки зі сталевим штампованим каркасом, які застосовують як на вантажному, так і пасажирському рухомому складі. Незважаючи на відмінності конструкції несучого елемента, обидва типи забезпечують роботу в широкому діапазоні температур навколишнього середовища (від -60 до $+50$ °C), витримують значні контактні навантаження та мають достатню механічну міцність за багаторазових циклів гальмування.

Порівняльний аналіз показує, що саме композиційні гальмові колодки нині забезпечують найбільш збалансоване поєднання експлуатаційних характеристик серед фрикційних матеріалів, які застосовують на колодкових гальмах пасажирських вагонів. Стабільність коефіцієнта тертя, значний ресурс роботи, невелика маса і можливість зниження експлуатаційних витрат зумовили їх домінуюче використання на вантажних вагонах і більшості сучасних пасажирських вагонів. Водночас проблема інтенсивного тепловиділення та пов'язаного з ним утворення термомеханічних пошкоджень колісних пар потребує подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення композиційних фрикційних матеріалів.

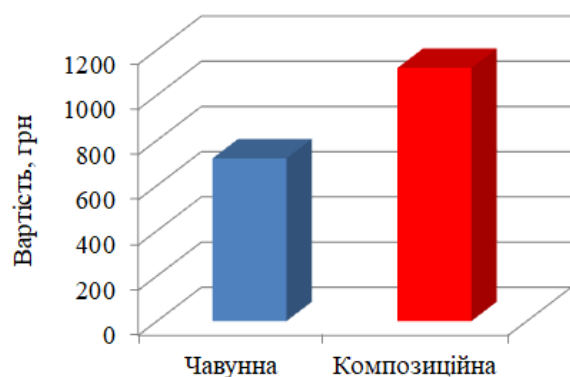
Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик гальмових колодок

Ефективність застосування гальмових колодок визначена сукупністю триботехнічних, конструктивних, експлуатаційних та економічних показників. До основних критеріїв оцінювання належать коефіцієнт тертя, необхідна сила натискання, ресурс роботи, маса виробу, вартість, вплив на технічний стан колісних пар, а також експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу рухомого складу. Комплексний аналіз зазначених характеристик дає змогу обґрунтувати доцільність застосування того чи іншого типу гальмових колодок залежно від умов експлуатації [15, 24].

Порівняння показує, що композиційні колодки мають вищий і більш стабільний коефіцієнт тертя порівняно з чавунними. Завдяки цьому необхідний рівень гальмового зусилля забезпечений за менших сил натискання з боку гальмової важільної передачі. Для чавунних колодок нормативне натискання, залежно від типу рухомого складу та режиму гальмування, становить 38–45 кН на одну колодку, тоді як для композиційних аналогічний гальмовий ефект може бути досягнутий за натискання 26–34 кН. Зменшення навантаження на 20–30 % сприяє підвищенню довговічності деталей важільної передачі, зниженню механічних втрат і скороченню витрат стисненого повітря за рахунок меншого тиску в гальмових циліндрах.

Важливою перевагою композиційних колодок є їхній значно більший ресурс експлуатації. Незважаючи на те, що їхня вартість приблизно в півтора-два рази перевищує вартість чавунних колодок, строк служби збільшується у три-п'ять разів (рис. 3). Це дає змогу скоротити кількість замін, зменшити трудомісткість технічного обслуговування, знизити питомі експлуатаційні витрати протягом усього періоду використання рухомого складу. Додатковим чинником є менша маса композиційних колодок, що зменшує інерційні навантаження на елементи гальмової важільної передачі та полегшує виконання ремонтних робіт.

а



б

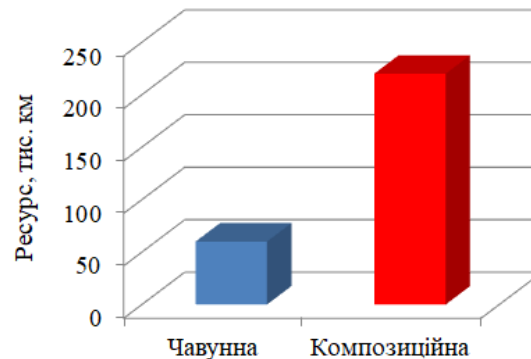


Рис. 3. Порівняльні гістограми вартості (а) і строку служби (б) чавунних і композиційних колодок

Крім наведених переваг, композиційні матеріали мають і певні експлуатаційні обмеження. Їхня нижча теплопровідність призводить до інтенсивнішого накопичення теплоти в зоні фрикційного контакту, унаслідок чого температура поверхні кочення колеса може досягати вищих значень, ніж у разі використання чавунних колодок. За

умов тривалого або багаторазового гальмування це підвищує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень колісних пар, що необхідно враховувати під час вибору типу фрикційного матеріалу для конкретних умов експлуатації.

Основні результати порівняльного аналізу наведено в таблиці.

Таблиця

Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик
чавунних і композиційних гальмових колодок

Показник	Чавунна колодка	Композиційна колодка	Перевага
Коефіцієнт тертя	0,20–0,28	0,30–0,42	
Необхідне натискання на одну колодку, кН	38–45	26–34	менше на 25–30 %
Тиск у гальмовому циліндрі для забезпечення однакового гальмового ефекту, МПа	0,36–0,40	0,24–0,30	менше на 20–30 %
Зусилля у важільній передачі, кН	75–90	55–70	менше на 20–25 %
Питомий тиск на поверхню тертя, МПа	1,6–2,0	1,2–1,5	менше на 15–25 %
Ресурс роботи	1	3–5	більше у три-п'ять разів
Маса однієї колодки, кг	14–15	8–10	менше на 30–40 %
Орієнтовна ринкова вартість однієї колодки, грн	650–800	1000–1400	більше у два рази
Вартість 1000 км пробігу	Вища	Нижча	
Частота заміни	Висока	Низька	
Витрати стисненого повітря	Більша	Менша	
Придатність до експлуатації на високих швидкостях	Обмежена	Висока	
Температура поверхні колеса	Нижча	Вища	
Імовірність термічних дефектів колеса	Менша	Більша	
Рівень шуму	Вищий	Нижчий	

Аналіз даних таблиці свідчить, що композиційні гальмові колодки переважають чавунні за більшістю експлуатаційних показників. Насамперед це стосується стабільності фрикційних властивостей, ресурсу роботи, маси виробу,

необхідного натискання для реалізації заданого гальмового ефекту. Використання композиційних матеріалів дає змогу знизити навантаження на елементи гальмової важільної передачі, зменшити тиск у гальмових циліндрах і скоротити витрати

стисненого повітря, що позитивно впливає на ефективність функціонування пневматичної гальмової системи.

Водночас переваги композиційних колодок супроводжені збільшенням теплового навантаження на поверхню кочення коліс. Саме тому під час оцінювання їхньої ефективності необхідно враховувати не лише триботехнічні показники та ресурс роботи, а і вплив температурних процесів на довговічність колісних пар і витрати, пов'язані з їхнім ремонтом або відновленням. Для локомотивів із бандажними колесами та рухомого складу, що експлуатують в особливо важких режимах гальмування, застосування чавунних колодок залишається технічно обґрунтованим.

Для комплексного оцінювання різних типів гальмових колодок доцільно використовувати інтегральний показник ефективності, який одночасно враховує триботехнічні, експлуатаційні та економічні характеристики фрикційного матеріалу. На відміну від аналізу окремих показників, такий підхід дає змогу виконувати об'єктивно техніко-економічне порівняння різних конструкцій та обґрунтовувати їх раціональний вибір з урахуванням умов експлуатації [28-30].

Інтегральний показник ефективності можна визначити за залежністю

$$K_{ef} = \frac{\mu \cdot R}{C \cdot N}, \quad (2)$$

де K_{ef} – інтегральний показник ефективності гальмової колодки;

μ – коефіцієнт тертя;

R – ресурс роботи колодки, км;

C – вартість колодки, грн;

N – необхідне натискання для забезпечення заданого гальмового зусилля, Н.

Залежність (2) відображає взаємозв'язок між основними експлуатаційними характеристиками гальмових колодок. Зі збільшенням коефіцієнта тертя і ресурсу роботи значення інтегрального показника ефективності зростає, це вказує на підвищення ефективності використання колодок (рис. 4). Водночас збільшення їхньої вартості або необхідного натискання призводить до зменшення значення показника, оскільки супроводжено підвищенням експлуатаційних витрат і навантаження на елементи гальмової системи.

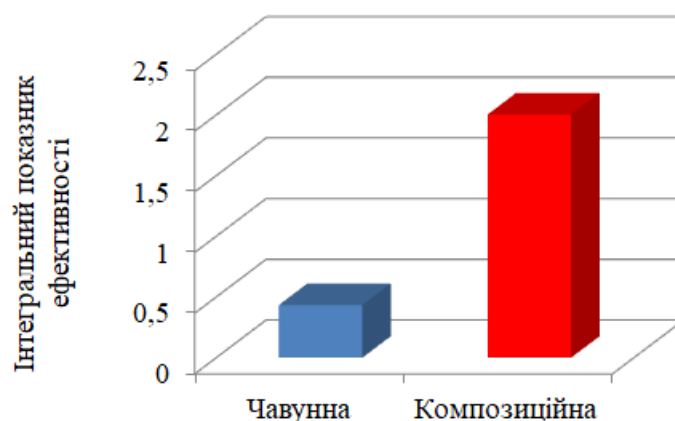


Рис. 4. Порівняння інтегрального показника ефективності чавунних і композиційних колодок

Як видно з рис. 4, інтегральний показник ефективності композиційної гальмової колодки приблизно в 4,6 раза перевищує аналогічний показник чавунної. Це пояснюють поєднанням вищого коефіцієнта тертя, значно більшого ресурсу роботи і меншого необхідного натискання, що компенсує її більшу закупівельну вартість і підтверджує техніко-економічну доцільність застосування композиційних гальмових колодок на сучасному залізничному рухомому складі. Отже, використання інтегрального показника дає змогу виконувати комплексне техніко-економічне порівняння різних типів гальмових колодок та обґрунтовувати їх раціональний вибір залежно від умов експлуатації рухомого складу.

Висновки

У результаті проведеного дослідження виконано порівняльний аналіз сучасних типів гальмових колодок та оцінено їхній вплив на технічні та економічні показники роботи гальмової системи. Отримано такі результати:

1. Виконано порівняльний аналіз триботехнічних характеристик різних типів гальмових колодок. Встановлено, що композиційні матеріали забезпечують коефіцієнт тертя на рівні 0,30–0,42, що перевищує аналогічний показник чавунних колодок (0,20–0,28). Це дає змогу підвищити стабільність реалізації гальмового зусилля та збільшити ресурс колодок у три-п'ять разів. Разом із тим нижча теплопровідність композиційних матеріалів сприяє підвищенню температури поверхні кочення колеса, що збільшує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень.

2. Оцінено вплив матеріалу гальмових колодок на параметри роботи гальмової системи. Встановлено, що використання композиційних колодок допомагає зменшити необхідне натискання на одну колодку приблизно на 20–30 %, знизити тиск у гальмовому циліндрі та навантаження на елементи гальмової важільної передачі, а також скоротити

витрати стисненого повітря під час гальмування. Отримані результати підтверджують, що вибір матеріалу колодки безпосередньо впливає не лише на ефективність процесу гальмування, а і режими роботи пневматичного гальмового обладнання.

3. Проведено техніко-економічне порівняння чавунних і композиційних гальмових колодок. Встановлено, що, незважаючи на вищу закупівельну вартість композиційних колодок (приблизно в півтора-два рази), їхній експлуатаційний ресурс перевищує ресурс чавунних у три-п'ять разів, що забезпечує зниження витрат на технічне обслуговування, скорочення кількості замін і зменшення експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу рухомого складу.

Подальше підвищення ефективності гальмових систем доцільно здійснювати через розроблення композиційних матеріалів із покращеними теплопровідними властивостями, оптимізацію конструкції каркасів і фрикційного шару, а також комплексне врахування взаємозв'язку між характеристиками гальмових колодок і параметрами роботи пневматичної гальмової системи. Такий підхід дасть змогу одночасно підвищити гальмову ефективність, знизити експлуатаційні витрати і збільшити ресурс елементів гальмового обладнання.

Отримані результати можуть бути використані як науково обґрунтована основа для вибору типу гальмових колодок під час проєктування, модернізації та експлуатації гальмових систем залізничного рухомого складу. Комплексне врахування триботехнічних, теплотехнічних, експлуатаційних та економічних показників дає змогу підвищити ефективність функціонування гальмової системи, зменшити витрати на технічне обслуговування і забезпечити раціональне використання матеріальних ресурсів під час експлуатації вагонного парку.

Список використаних джерел

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010> (last access: 11.07.2026).
2. Ravlyuk, V. G. (2015). Determining the technical condition of rolling stock bushings by means of vibration diagnostics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 7(74), 11–15. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036> (last access: 11.07.2026).
3. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. URL: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197> (last access: 11.07.2026).
4. Ловська, А. О., & Равлюк, В. Г. (2022). Дослідження ненормативного зносу гальмових колодок і його вплив на ефективність гальмування вантажних поїздів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*, 25, 30–50.
5. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019> (last access: 11.07.2026).
6. Сафронов, О. М. (2009). Дослідження дискової гальмівної системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*, 14, 51–67.
7. Равлюк, В., Равлюк, М., Фісіна, Я., & Нуруллаєв, Р. (2020). Уточнені розрахунки 2D схем-моделей гальмових важільних передач для збільшення ресурсу колодок вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 35, 24–34.
8. Сафронов, О. М. (2018). Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології*, 32 (2), 61–75.
9. Равлюк, В. Г., Нечволода, С. І. До вирішення проблеми зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. Вип. 86. С. 140–143.
10. Ловська, А. О., & Равлюк, В. Г. (2022). Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 40, 102–120.
11. Равлюк, В. Г., Ловська, А. О., Скуріхін, Д. І., Рибін, А. В., & Равлюк, М. Г. (2025). Дослідження впливу конструктивних параметрів гальмової системи вантажного вагона на безпеку експлуатації залізничного рухомого складу. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*, 30, 56–74. URL: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-56-74> (дата звернення: 11.07.2026).
12. Калабухін, Ю. Є., Мартинов, І. Е., & Труфанова, А. В. (2022). Аналіз експлуатаційних складових економіко-технологічних станів життєвого циклу пасажирських вагонів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*, 24, 124–139. URL: <https://doi.org/10.4675/2304-6309-2022-24-124-139> (дата звернення: 11.07.2026).
13. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Derevianchuk, Y., Bereznyi, V., & Bohutskyi, V. (2025). Optimal application force distribution between brake blocks of freight wagons. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1638(1), 012100. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1638/1/012100> (last access: 11.07.2026).

14. Lyu, Y., Bergseth, E., Wahlström, J., & Olofsson, U. (2019). Temperature dependence of friction characteristics of cast iron, organic and sintered brake block materials for railway applications. *Wear*, 432–433, 202942. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202942> (last access: 11.07.2026).
15. Мазур, В. Л., Найдек, В. Л., & Попов, Є. С. (2021). Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*, 2 (325), 30 – 39.
16. Ravlyuk, V. G., Mykhalkiv, S. V., Rybin, A. V., Derevianchuk, Ia. V., Plakhtiy, O. A. (2020). Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 48–54. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048> (last access: 11.07.2026).
17. Megna, G., & Bracciali, A. (2025). Block Brakes in Railway Systems: A Review. *Machines*, 13 (7), 579. URL: <https://doi.org/10.3390/machines13070579> (last access: 11.07.2026).
18. Panchenko, S., Lovska, A., Ravlyuk, V., Babenko, A., Derevyanchuk, O., Zharova, O., & Derevianchuk, Y. (2023). Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 7 (125), 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791> (last access: 11.07.2026).
19. Zhang, Y., Wang, Y., et al. Effect of icing on braking performance of freight trains equipped with composite brake blocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1177/09544097231151474> (last access: 11.07.2026).
20. Nisiewicz, P., & Sawczuk, W. (2025). Composite brake blocks in railway freight wagons: operational problems. *Rail Vehicles / Pojazdy Szynowe*, 1–2, 9–17. URL: <https://doi.org/10.53502/RAIL-209083> (last access: 11.07.2026).
21. Ravlyuk, V., Derevianchuk, Y., & Pohorielov, S. (2021). Удосконалення механічної гальмової системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 38, 272–284. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38> (дата звернення: 11.07.2026).
22. Vakkalagadda, M., Thakare, H., Racherla, V., et al. (2015). Performance analyses of cast iron and composite brake blocks using full-scale inertia dynamometer for Indian Railways. *Wear*, 328–329, 64–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006> (last access: 11.07.2026).
23. ЦТ–ЦВ–ЦЛ–0015. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: затв. Наказом Укрзалізниці від 28.10.1997 р. № 264-Ц. Київ, 2004. 146 с.
24. Сіренко, К. А., & Мазур, В. Л. (2026). Ефективність застосування гальмових колодок на залізничному транспорті, виготовлених із чавуну і композиційної гумосуміші. *Метал та лиття України*, 1, 65–74. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.065> (дата звернення: 11.07.2026).
25. Zanelli, F., Castelli Dezza, F., Mauri, M., Debattisti, N., & Mazzucco, I. (2023). On the Development of a Diagnostic System for Condition Based Maintenance of Passenger Trains. 2023 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403337> (last access: 11.07.2026).
26. Равлюк, В. Г., Ловська, А. О., Дерев'янчук, Я. В., & Стасів, Н. Л. (2026). Підвищення достовірності діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів на основі аналізу параметрів пневматичних процесів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.*, 216, 170–186. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362536> (дата звернення: 11.07.2026).
27. Ravlyuk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravlyuk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, 2, 9 (80), 35–41. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007> (last access: 11.07.2026).

28. Калабухін, Ю. Є., Зоріна, О. І., Ловська, А. О., Каменева, Н. М., & Рукавішніков П. В. (2025). Оцінювання підвищення ефективності використання напіввагонів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 1 (160), 37–45. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326789> (дата звернення: 11.07.2026).

29. Калабухін, Ю. Є., Мартинов, І. Е., Труфанова, А. В., & Литовченко, О. М. (2025). Обґрунтування доцільності модернізації буксових вузлів вантажних вагонів. *Комунальне господарство міст*, 6 (194), 399–405. URL: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-399-405> (дата звернення: 11.07.2026).

30. Кравченко, О. О., & Андрєєва, О. В. (2012). Моделювання оцінки економічної ефективності інвестиційних проектів на залізничному транспорті в умовах економічної кризи. *Ефективна економіка*, 12. URL: <https://www.ekonomy.nayka.com.ua>

References

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010>

2. Ravlyuk, V. G. (2015). Determining the technical condition of rolling stock bushings by means of vibration diagnostics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (74)), 11–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036>

3. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197>

4. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. H. (2022). Doslidzhennia nenormatyvnoho znosu halmovykh kolodok i yoho vplyvu na efektyvnist halmuvannia vantazhnykh poizdiv [Study of abnormal wear of brake blocks and its influence on the braking efficiency of freight trains]. *Reikovy Rukhomyi Sklad*, 25, 30–50 [in Ukrainian].

5. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019>

6. Safronov, O. M. (2009). Doslidzhennia dyskovoi halmovoi systemy pasazhyrskoho vahoha [Investigation of the disc brake system of a passenger railway car]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya «Transportni systemy i tekhnologii»*, 14, 51–67 [in Ukrainian].

7. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Fisina, Ya., & Nurullaiev, R. (2020). Utochneni rozrakhunky 2D skhem-modelei halmovykh vazhilnykh peredach dlia zbilshennia resursu kolodok vantazhnykh vahoniv [Refined calculations of 2D models of brake rigging systems for increasing the service life of freight wagon brake blocks]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnologii. Seriya «Transportni systemy i tekhnologii»*, 35, 24–34 [in Ukrainian].

8. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannia kompiuternoho modeliuвання dlia utochnenoi otsinky halmovoi efektyvnosti vantazhnykh vahoniv [Application of computer simulation for refined assessment of freight wagon braking efficiency]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnologii. Seriya «Transportni systemy i tekhnologii»*, 32 (2), 61–75 [in Ukrainian].

9. Ravlyuk, V. H., & Nechvoloda, S. I. (2017). Do vyrishennia problemy znosu halmovykh kolodok u vizkakh vantazhnykh vahoniv [Towards solving the problem of brake block wear in freight

wagon bogies]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 86, 140–143 [in Ukrainian].

10. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. H. (2022). Vyiavleniia prychyn utvorennia poverkhnevyykh defektiv kolis vahoniv, obladnanykh kompozytsiynymy kolodkamy [Identification of the causes of surface defects on railway wheels equipped with composite brake blocks]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii»*, 40, 102–120 [in Ukrainian].

11. Ravlyuk, V. H., Lovska, A. O., Skurikhin, D. I., Rybin, A. V., & Ravliuk, M. H. (2025). Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh parametriv halmovoi systemy vantazhnoho vahoza na bezpeku ekspluatatsii zaliznychnoho rukhomoho skladu [Investigation of the influence of freight wagon brake system design parameters on the operational safety of railway rolling stock]. *Reikovy Rukhomyi Sklad*, 30, 56–74. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-56-74> [in Ukrainian].

12. Kalabukhin, Yu. Ye., Martynov, I. E., & Trufanova, A. V. (2022). Analiz ekspluatatsiinykh skladovykh ekonomiko-tekhnolohichnykh staniv zhyttievoho tsyklu pasazhyrskykh vahoniv [Analysis of operational components of the economic and technological states of the passenger car life cycle]. *Reikovy Rukhomyi Sklad*, 24, 124–139. <https://doi.org/10.4675/2304-6309-2022-24-124-139> [in Ukrainian].

13. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Derevianchuk, Y., Bereznyi, V., & Bohutskyi, V. (2025). Optimal application force distribution between brake blocks of freight wagons. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1638 (1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1638/1/012100>

14. Lyu, Y., Bergseth, E., Wahlström, J., & Olofsson, U. (2019). Temperature dependence of friction characteristics of cast iron, organic and sintered brake block materials for railway applications. *Wear*, 432–433, 202942. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202942>

15. Mazur, V. L., Naidek, V. L., & Popov, Ye. S. (2021). Porivniannia chavunnykh i kompozytsiinykh z chavunnymy vstavkamy halmovykh kolodok dlia rukhomoho skladu zaliznytsi [Comparison of cast iron and composite brake blocks with cast iron inserts for railway rolling stock]. *Metal ta Lyttia Ukrainy*, 2 (325), 30–39 [in Ukrainian].

16. Ravlyuk, V. G., Mykhalkiv, S. V., Rybin, A. V., Derevianchuk, Ia. V., & Plakhtii, O. A. (2020). Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 48–54. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048>

17. Megna, G., & Bracciali, A. (2025). Block brakes in railway systems: A review. *Machines*, 13 (7), 579. <https://doi.org/10.3390/machines13070579>

18. Panchenko, S., Lovska, A., Ravlyuk, V., Babenko, A., Derevyanchuk, O., Zharova, O., & Derevianchuk, Y. (2023). Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791>

19. Zhang, Y., Wang, Y., et al. (2023). Effect of icing on braking performance of freight trains equipped with composite brake blocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. <https://doi.org/10.1177/09544097231151474>

20. Nisiewicz, P., & Sawczuk, W. (2025). Composite brake blocks in railway freight wagons: Operational problems. *Rail Vehicles / Pojazdy Szynowe*, 1–2, 9–17. <https://doi.org/10.53502/RAIL-209083>

21. Ravliuk, V., Derevianchuk, Y., & Pohorielov, S. (2021). Udoskonalennia mekhanichnoi halmovoi systemy pasazhyrskoho vahoza [Improvement of the mechanical brake system of a passenger railway car]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta*

tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 38. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38> [in Ukrainian].

22. Vakkalagadda, M., Thakare, H., Racherla, V., et al. (2015). Performance analyses of cast iron and composite brake blocks using full-scale inertia dynamometer for Indian Railways. *Wear*, 328–329, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006>

23. Instruktsiia (2004). Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu [Instruction for operation of railway brakes]. Kyiv: Ukrzaliznytsia, 146 [in Ukrainian].

24. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2026). Efektyvnist zastosuvannia halmovykh kolodok na zaliznychnomu transporti, vyhotovlenykh iz chavunu i kompozytsiinoi humosumishi [Efficiency of using cast iron and composite rubber brake blocks in railway transport]. *Metal ta Lyttia Ukrainy*, 1, 65–74. <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.065> [in Ukrainian].

25. Zanelli, F., Castelli Dezza, F., Mauri, M., Debattisti, N., & Mazzucco, I. (2023). On the development of a diagnostic system for condition based maintenance of passenger trains. In *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (p. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403337>

26. Ravlyuk, V. H., Lovska, A. O., Derevianchuk, Ya. V., & Stasiv, N. L. (2026). Pidvyshchennia dostovirnosti diahnostuvannia halmovoho obladnannia pasazhyrskykh vahoniv na osnovi analizu parametriv pnevmatychnykh protsesiv [Improving the reliability of diagnostics of passenger railway car brake equipment based on the analysis of pneumatic process parameters]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 216, 170–186. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362536> [in Ukrainian].

27. Ravlyuk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravliuk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (80)), 35–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007>

28. Kalabukhin, Yu. Ye., Zorina, O. I., Lovska, A. O., Kameneva, N. M., & Rukavishnikov, P. V. (2025). Otsiniuvannia pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia napivvahoniv [Assessment of improving the efficiency of open freight wagon utilization]. *Informatsiino-keruiuchi Systemy na Zaliznychnomu Transporti*, 1 (160), 37–45. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326789> [in Ukrainian].

29. Kalabukhin, Yu. Ye., Martynov, I. E., Trufanova, A. V., & Lytovchenko, O. M. (2025). Obgruntuvannia dotsilnosti modernizatsii buksovykh vuzliv vantazhnykh vahoniv [Substantiation of the feasibility of modernization of freight wagon axle box assemblies]. *Komunalne Hospodarstvo Mist*, 6 (194), 399–405. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-399-405> [in Ukrainian].

30. Kravchenko, O. O., & Andrieieva, O. V. (2012). Modeliuvannia otsinky ekonomichnoi efektyvnosti investytsiinykh proektiv na zaliznychnomu transporti v umovakh ekonomichnoi kryzy [Modeling the assessment of the economic efficiency of investment projects in railway transport under conditions of economic crisis]. *Efektyvna Ekonomika*, 12 <https://www.ekonomy.nayka.com.ua> [in Ukrainian].

Сафронов Александр Михайлович, доктор технічних наук, старший дослідник, Директор ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5865-7756>.

E-mail: safronov@ukrdiv.com.ua

Калабухін Юрій Євгенович, доктор технічних наук, професор кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Safronov Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Director of the State Enterprise “Ukrainian Research Institute of Carriage Building”. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5865-7756>. E-mail: safronov@ukrndiv.com.ua
Kalabukhin Yuri, Dr. Sc. (Tech.), Professor Department of Marketing, commercial activities and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.
Babenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.
E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Дата надходження статті: 23.07.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 07.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY