

Загурський А.О.
Національний університет
біоресурсів і
природокористування
України.,
м. Київ, Україна
E-mail:
andreyzagurskiy1@gmail.com

**ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ВИКОРИСТАННЯ ДИСКОВИХ
ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ КОЛІСНИХ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

<https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.108-118>

УДК 621.083

Загурський А.О. Фактори впливу на ефективність використання дискових гальмівних систем колісних транспортних засобів.

Анотація. Існуючі вимоги до сучасного рухомого складу призводять до необхідності збільшення швидкостей його руху. Однак для створення необхідної ефективності та якості роботи автотранспортного засобу в першу чергу має бути забезпечений високий рівень безпеки руху. За безпеку руху великою мірою відповідає гальмівна система. Тому й вимоги до надійності роботи гальмівної системи автомобіля стосовно забезпечення безпеки руху стають більш жорсткими. В даній роботі проведено огляд дискових гальмівних систем автомобільного транспорту та розглянуто основні фактори що впливають на ефективність їх використання. Їх огляд показав, що вибір геометричних характеристик дискових гальм залежить від вантажопідйомності та умов експлуатації, які необхідно враховувати на початковому етапі проектування, поряд з типом матеріалу виготовлення. Досвід експлуатації дискових гальм свідчить, що у найважчих умовах роботи знаходиться фрикційна пара (накладки та диск), адже при гальмуванні можуть одночасно виникати статичні, динамічні, теплові навантаження. У більшості випадків конструкції дискових гальм мають виключати перегрів між диском і колодкою через тертя в процесі гальмування. фізичні, механічні та хімічні властивості використовуваних матеріалів впливають на поведінку та ефективність гальмування. Крім режиму експлуатації, на тривалість використання гальмівних дисків впливає і нормальна робота всіх найближчих вузлів. Висока ефективність роботи гальмівної системи у першу чергу потребує наявності усіх елементів із найвищою якістю та надійністю роботи.

Ключові слова: автомобільний засіб, гальмівний механізм, дискові гальма, зношування, ефективність використання, пари тертя, фрикційні матеріали.

Zagurskiy A.O. Factors affecting the efficiency of the use of disc brake systems of wheeled vehicles.

Abstract. The prevailing requirements for modern rolling stock necessitate an increase in its speed. To achieve the requisite efficiency and operational quality of a vehicle, paramount attention must be directed towards ensuring a high level of traffic safety. The braking system plays a crucial role in upholding road traffic safety. Consequently, the demands for the reliability of an automobile's braking system to safeguard traffic have become more stringent. This study provides an extensive overview of disc brake systems in automobile transport and delves into the principal factors influencing their operational efficiency. The review underscores that the geometric characteristics of disc brakes are contingent upon load capacity and operational conditions. These considerations must be

meticulously accounted for during the initial design phase, alongside the selection of manufacturing materials. The operational experience of disc brakes reveals that the friction pair (comprising pads and disc) operates under challenging conditions, given the simultaneous occurrence of static, dynamic, and thermal loads during braking. In most instances, the design of disc brakes should preclude overheating between the disc and the pad, a phenomenon triggered by friction during braking. The physical, mechanical, and chemical properties of the materials employed significantly influence braking behavior and performance. The duration of brake disc usage is further impacted by the seamless operation of all adjacent components. The high efficiency of the braking system necessitates the incorporation of elements characterized by both high quality and reliability.

Key words: *automobile, brake mechanism, disc brakes, wear, efficiency of use, friction pairs, friction materials.*

Постановка проблеми

Сучасні уявлення про природу тертя і зношування свідчать про те, що цей процес не є Неналежний технічний стан експлуатації автомобілів, є однією з основних причин виникнення багатьох ДТП.

Аварії, що виникають із-за відмови різних систем автомобіля, несуть за собою найтяжчі наслідки. І одним з ключових факторів що може допомогти запобігти ДТП є здатність автомобіля загальмувати в потрібний момент.

Тому гальмівну систему вважають однією з найважливіших систем великогабаритних транспортних засобів, особливо з огляду на забезпечення їх безпечної експлуатації.

Основна вимога, що висувається до гальмівних систем – це забезпечення максимального контролю водія над транспортним засобу під час його руху, плавної зупинки автомобіля, а також найменші час і відстань гальмування в небезпечних ситуаціях.

До безпечної функціональності транспортного засобу відносять можливість його переміщення на підйомах і схилах, а також утримувати машина у нерухомому стані, під час зупинки, обслуговування, або відпочинку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженню гальмівних властивостей та вдосконаленню гальмівних систем присвячені наукові праці багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених В. Байцур [1], А. Део [2]; М. Подригало та А. Коробко [3]; С. Чен [4]; П. Фір і Л. Хендерсон [5] та інші, у яких розглядаються як окремі підсистеми (гальмові механізми, гальмові приводи, регулятори гальмівних сил (РГС), антиблокувальні системи тощо), так і певні поєднання цих підсистем і, рідше, в сукупності з деякими іншими функціонально пов'язаними підсистемами транспортних засобів.

Наведені в них фундаментальні результати є основою для проведення подальших комплексних та поглиблених досліджень з метою виявлення резервів підвищення ефективності гальмування та забезпечення стійкості гальмуючих транспортних засобів.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є огляд дискових гальмівних систем та факторів що впливають на ефективність їх використання.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Гальмування – досить складний процес, на який часто впливають і одночасно обмежують різні умови, що зумовлює інтерес до знання впливу таких параметрів/факторів, як уповільнення, кінетична енергія, виконавче зусилля, гальмівне зусилля, вага транспортного засобу, контактна поверхня, коефіцієнт тертя, коефіцієнт зчеплення, аеродинаміка транспортного засобу максимальне гальмівне зусилля, ухил дороги, відстань та час гальмування з використанням математичних чи імітаційних концепцій [6].

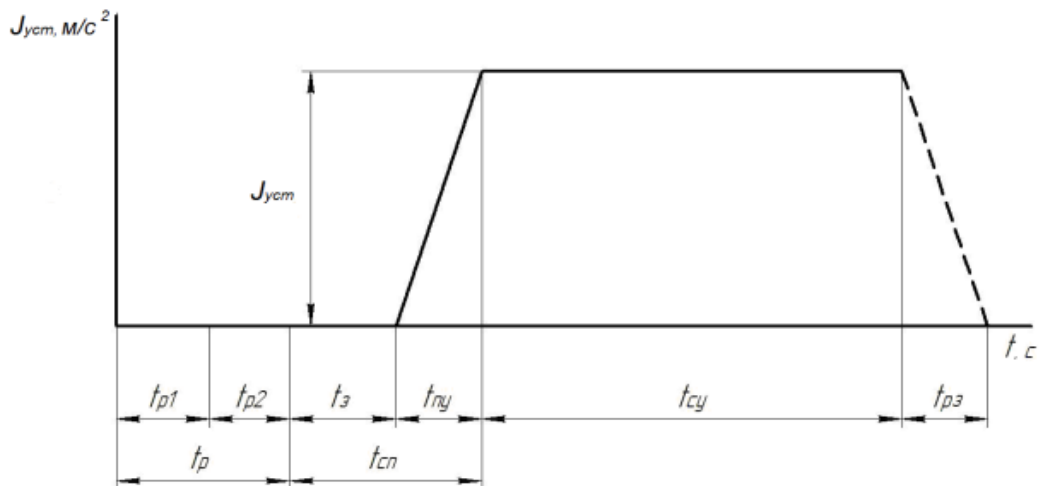


Рис. 1. Гальмівна діаграма автомобіля: t_p – тривалість реакції водія; $t_{сп}$ – тривалість спрацьовування гальмівної системи; $t_{гс}$ – тривалість гальмування зі сталим уповільненням; $t_{рз}$ – тривалість розгальмування

Джерело: Сосик А. Ю. Шляхи зменшення тривалості спрацьовування гальмівної системи під час екстреного гальмування автомобіля. Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. 2014. № 1. 61-66.

В літературних джерелах під гальмівними властивостями автомобіля розуміють здатність транспортного засобу здійснювати сповільнення до встановленої величини та утримувати його в нерухомому стані в разі такої необхідності. До показників, які характеризують процес гальмування Байцур М. В. [1], Ву Х. і Фу, С. [7], Сурбліс В., Соколовський Е. [7] відносять:

- час гальмування;
- гальмівний шлях;
- зупинний шлях;
- сповільнення гальмування;
- відносне сповільнення (відношення сповільнення до прискорення вільного падіння);

– питому гальмівну силу у розрахунку до повної маси автомобіля.

Аналізуючи процес гальмування автомобіля, можна виявити, що він поділений на два основні етапи. Перша етап – це фаза реакції водія на прийняття рішення про гальмування, яка у середньому становить від 0,5 до 2 секунд. Відстань, створена за цей час, називається дистанцією реакції. Другий етап – від початку гальмування до повної зупинки автомобіля. Відстань, пройдена за час гальмування, називається «гальмівним шляхом», який розраховується за формулою:

$$S = (t_p + t_t + \Delta t_{ny}) \frac{v}{3,6} - 1,6\phi t_3^2 + \frac{(v_1 - 17,7\phi t_3^2)}{254\phi}, \quad (1)$$

де t_p – тривалість реакції водія, с;

t_3 – тривалість запізнювання дії гальмівного приводу, с;

Δt_{ny} – тривалість росту кривої уповільнення; приведення в дію гальм, с;

ϕ – коефіцієнт зчеплення з дорогою;

v – швидкість руху транспортного засобу, м/с.

Ефективність гальмування та забезпечення курсової стійкості автомобіля залежить від низки чинників, серед них основними є:

- розподіл гальмівних сил по вісях;
- постійне високе значення коефіцієнта зчеплення коліс з покриттям;
- нормальне навантаження на вісь; справність підвіски й гальмівних механізмів та їх коректне налаштування.

Результати досліджень

Вимоги до гальмівних систем та гальмівних властивостей автомобілів регламентуються Правилами Єдиної Економічної комісії ООН № 13 від 2008 року.

Проте основним фактором, що впливає на гальмування автомобіля, залишається коефіцієнт зчеплення з дорогою. З таблиці 1 видно, що менший коефіцієнт зчеплення сприяє збільшенню гальмівного шляху, збільшенню відповідного часу гальмування та вищої ймовірності нещасного випадку при гальмуванні. При цьому стан дорожнього покриття теж суттєво впливає на процес гальмування. Відповідно гальмівні диски автомобіля повинні мати відмінні гальмівні характеристики, щоб відповідати потребам автомобіля у гальмуванні у різних дорожніх умовах.

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта зчеплення, гальмівного шляху та швидкості руху

Дорога	Коефіцієнт адгезії	Швидкість (км. год.)						
		10	20	30	40	50	60	70
Крижані дороги, глиниста пустка	0,2–0,3	2	7,9	17,7	31,5	49,2	70,8	96,4
Мокрий асфальт та бетон	0,3–0,4	1	3,9	8,8	15,7	24,6	35,4	48,2
Суха гравійна дорога	0,6–0,7	0,7	2,6	5,9	10,5	16,4	23,6	32,1
Сухий асфальт або бетон	0,7–0,8	0,6	2,2	5	9	14	20,2	27,5

Джерело: Li, W.; Yang, X.; Wang, S.; Xiao, J.; Hou, Q. Comprehensive Analysis on the Performance and Material of Automobile Brake Discs. *Metals* 2020, 10, 377. <https://doi.org/10.3390/met10030377>

Гальмівний механізм призначений для створення гальмівного моменту, необхідного для уповільнення і зупинки автомобіля. На автомобілях встановлюються фрикційні гальмівні механізми, робота яких заснована на використанні сил тертя. В даний час існує кілька типів гальм в залежності від сфери застосування: барабанні, дискові, стрічкові та конічні. Найбільш поширення у техніці мають перші два типи, проте в цілях нашого дослідження основну увагу приділимо дисковим гальмам.

Дискові гальмівні механізми встановлюються безпосередньо на колесі й складаються з обертової і нерухої частин. В якості обертової складової використовується дискове гальмо, нерухої частини – гальмівні колодки.

Дискове гальмо – елемент, закріплений на маточині колеса, обертається одночасно зі швидкістю автомобіля, утворюючи рухомий елемент гальмівної системи.

З поверхнею або зоною тертя дискового гальма взаємодіють колодки, з якими транспортний засіб зупиняється завдяки постійному тертю, яке встановлюється між колодками та диском. У ході цього процесу відбувається перетворення кінетичної енергії (накопиченої в транспортному засобі через його швидкість) на теплову енергію, що у багатьох випадках призводить до збільшення нагріву гальмівної системи.

Дискові гальма відрізняються від інших типів тим, що зусилля, що додається, перпендикулярно доріжці диска, а не радіально, як у барабанних і стрічкових гальмах. Ще одна особлива характеристика полягає в тому, що момент тертя не впливає на момент спрацьовування (ефект самозбудження), як це відбувається в барабанних та конічних гальмах. Це явище дозволяє невеликим змінам коефіцієнта тертя не суттєво впливати на гальмівну силу, необхідну для зупинки транспортного засобу. Наприклад, зміна коефіцієнта тертя на 30%, що є нормальним явищем у вологому середовищі, призводить до збільшення гальмівної сили на 50% [9].

Існує кілька основних різновидів гальмівних дисків:

– вентильовані. Складаються з двох тонких частин, з'єднаних середнім шаром з каналами, що дозволяють ефективно охолоджувати деталь.

– невентильовані. Звичайна лита (відлита з чавунна) структура. Товщина таких гальмівних дисків зазвичай коливається в діапазоні 10-20 мм. Вони швидко нагріваються і зношуються.

– перфоровані диски мають отвори на поверхні. Недолік – ризик пошкодження при попаданні вологи на гарячу деталь.

– гальмівні диски з радіальними канавками – дозволяють відводити воду з робочої поверхні.

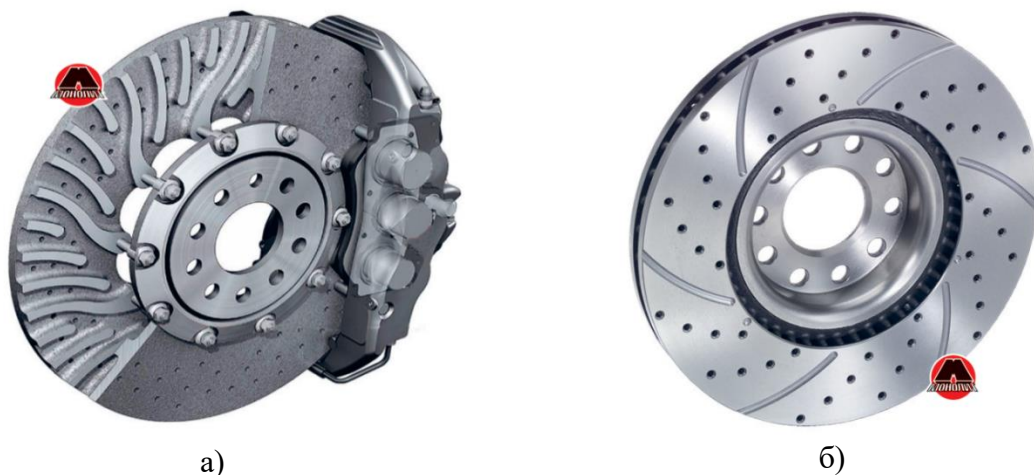


Рис. 2. Приклад вентильованого гальмівного диска: а) без канавок; б) із спеціальними канавками

Визначення та вибір геометричних характеристик дискових гальм залежить від вантажопідйомності та умов експлуатації, які є важливими факторами, які необхідно враховувати на початковому етапі проектування, поряд з типом матеріалу виготовлення. У більшості випадків конструкції дискових гальм мають виключати перегрів між диском і колодкою через тертя в процесі гальмування. Таким чином, фізичні, механічні та хімічні властивості використовуваних матеріалів впливають на поведінку та ефективність гальмування [10].

Гальмівні диски мають свій ресурс виробивши який підлягають заміні. Як правило, диски зношуються набагато повільніше, ніж гальмівні колодки – в середньому різниця в 2-3 рази). Міняють диски, найчастіше, за ступенем зносу: різні виробники

дають різні допуски на знос робочої частини, але в більшості випадків не більше 2-4 мм. Однак окрім стирання робочої площини, є ще кілька «ворогів» гальмівних дисків. Так на думку Джегадешваран Р.та Сугумаран В. [11], Пранта М.Х. [12] та інших дефектами гальмівних дисків є :

1. Корозія. Диски ржавіють найчастіше взимку, коли автомобіль довго простояє на відкритому повітрі. Досить 2-3 днів, щоб сіль, реактиви і вода викликали появу іржі на поверхні гальмівного диска. Небезпека корозії в нерівномірному пошкодженні металу, яке, може стати причиною руйнування диска при підвищеному навантаженні. Багато виробників наносять на поверхню диска спеціальні покриття, що запобігають появі іржі.

2. Деформація. З'являється від постійних перепадів температур (наприклад, потрапляння води на розігрітий диск) метал може змінити свою форму – викривляється робоча поверхня, що стає причиною вібрації і «биття» керма при гальмуванні.

3. Незначні пошкодження поверхні. Між поверхнею диска і колодками може потрапити бруд, дрібне сміття, тверді частинки. Вони викликають шорсткі зколи по краях і на площині диску, що впливає на якість його роботи.

4. Тріщини і відколи. Неякісний метал, використаний для виготовлення дешевих дисків, може не витримати навантажень. Диск тріскається, на ньому з'являються зколи, і в кінці-кінців він просто розвалюється в критичний момент.

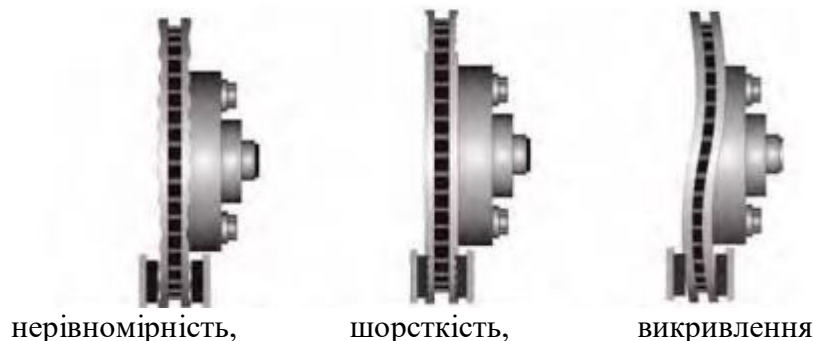


Рис. 3. Основні дефекти дисків

Слід зазначити, що звичайні (не карбонові) диски зношуються в будь-якому випадку, просто в процесі експлуатації. Але є фактори, що впливають на тривалість використання тормозних деталей.

– Пробки. Стояння в пробках – взагалі один з найбільш неприємних моментів для всіх вузлів автомобіля. Пересування маленькими ривками, з частим гальмуванням, швидко зношує диски і колодки. А особливо – в поєднанні з агресивною манерою їзди, коли доводиться «продиратися», об'їжджаючи автомобілі, які стоять поруч.

– Вантаж. Буксування причепа або просто велика завантаженість автомобіля, особливо при русі з гірки, досить сильно навантажує гальмівну систему, адже і гальмувати доводиться частіше, і зусилля маси набагато більше, ніж при відсутності завантаження.

– Бездоріжжя. Пересування по пересіченій місцевості - складне випробування, зношуються гальмівні диски в кілька разів швидше, ніж їзда по трасі.

Крім режиму експлуатації, на тривалість використання гальмівних дисків впливає і нормальна робота всіх найближчих вузлів: чи не зношені гальмівні колодки, правильно працює супорт, відсутність корозії на ступиці, відбалансування коліс, амортизаторів і передньої вісі.

Гальмівні пристрої на автомобільному транспорті є фрикційними, тобто працюють за рахунок тертя. Досвід експлуатації таких гальм свідчить, що у найважчих умовах роботи знаходиться фрикційна пара (накладки та диск). Деталі та вузли пари тертя у процесі гальмування піддаються впливу багатьох зовнішніх чинників. Тому при гальмуванні можуть одночасно виникати статичні, динамічні, теплові навантаження. До того ж деталі пари тертя зазнають фрикційного зносу.

Проблеми впливу зовнішніх факторів на пару тертя та дослідження вивчення фізико-хімічних процесів у фрикційному контакті відображено в працях багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених [13-16]. В них відмічається, що якість та надійність конструкцій створюваних фрикційних вузлів гальмівних пристроїв залежать від інтенсивності процесів, явищ і ефектів, що відбуваються під час фрикційної взаємодії мікроступів поверхонь тертя. Детальний огляд зазначених праць дає можливість зробити наступні висновки:

– при терті твердих тіл у приповерхневих шарах на контакті за рахунок механічного навантаження, що характеризується конкретними умовами, утворюється так зване «третє тіло»;

– «третє тіло» існує тільки під час контакту і володіє особливими властивостями;

– характерним для «третього тіла» є те, що в процесі тертя твердих тіл у залежності від умов навантаження завжди встановлюється оптимальна шорсткість.

Зміну мікрорельєфу поверхні у процесі припрацювання (притирання) відображено на рис. 4.

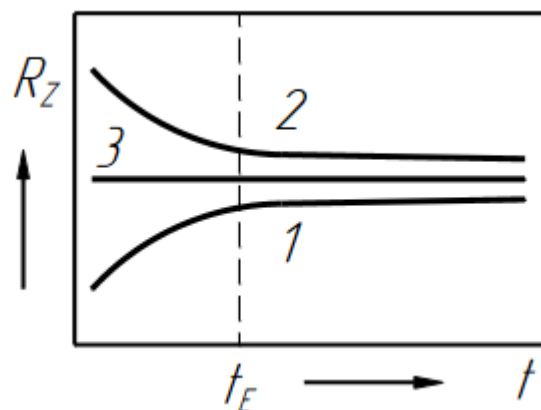


Рис. 4. Зміна мікрорельєфу поверхні у процесі припрацювання (притирання) залежно від початкових умов: 1 – надто низький ступінь початкової шорсткості; 2 – надто високий ступінь початкової шорсткості; 3 – оптимальна шорсткість; t_E – час опрацювання

Виходячи з положення про існування третього тіла, маємо на увазі, що граничні шари, які утворюються у місцях контакту при терті твердих тіл, володіють іншими властивостями ніж вихідний матеріал. Відповідно оцінка параметрів тертя і зношування, проведена на основі властивостей вихідного матеріалу, найчастіше буває лише наближеною, і для їх уточнення у більшості випадків потрібує проведення випробувань та подальшої перевірки [17].

Тому характеризуючи процес тертя фрикційної пари можна виділити і згрупувати три основні класи факторів, що найбільш впливають на нього:

1. Фізико-хіміко-механічні властивості тертя матеріалів та геометрія контактування поверхонь [18]. На параметри роботи пари тертя великий вплив має вибір їх матеріалів [19]. Для ефективної роботи гальмівного механізму підбирають

спеціальні фрикційні матеріали, які в контактi розвивають відносно високий та стабільний коефіцієнт тертя. Основною характеристикою фрикційних матеріалів є здатність поглинати або розсіювання кінетичної енергії без «катастрофічного» зношування самого матеріалу та його руйнування. До характеристик фрикційних матеріалів пред'являються такі вимоги, як:

- стабільність коефіцієнта тертя;
- висока зносостійкість;
- стабільність фрикційних властивостей за нагрівання (короткочасного і тривалого);
- термовтома;
- стійкість до утворення тріщин від теплових і силових навантажень;
- високий опір до схоплювання в холодному і нагрітому станах;
- опір до налипання;
- маслостійкість;
- відсутність виникнення автоколиваний;
- здатність працювати за температур 800...1000°.

2. Експлуатаційні характеристики режиму тертя (навантаження, швидкість, температура поверхні тертя, довкілля). За значного підвищенні температури вирішального впливу у роботі пари тертя має її конструкція, тобто такі параметри, як:

- маса елементів конструкції;
- об'єм тепловідведення;
- розміри і форма поверхонь тертя;
- коефіцієнт взаємного перекриття КВП.

Наявність ребер на внутрішній поверхні диска забезпечує «вентиляційний ефект» та збільшує інтенсивність теплообміну. Цей ефект суттєво зменшує теплову навантаженість дискового гальма навіть за короткочасних зупинкових гальмувань.

3. Конструктивні особливості вузла тертя (площа тертя, взаємне перекриття поверхонь, форма та розмір контактуючих елементів пари тертя, жорсткість конструкції тощо). Значного впливу на роботу пари тертя мають конструктивні особливості вузла тертя пов'язані з виведенням продуктів зношування із зони тертя та ефективністю тепловідведення із зони тертя. Залежно від властивостей пари тертя та режиму роботи вплив продуктів зносу на тертя та зношування може виражатися збільшенням та зменшенням коефіцієнта тертя, а може й і не впливати на нього. Факторами, що впливають на збереження частинок зносу в зоні тертя можуть бути:

- розмір площі тертя;
- наявність канавок або пазів на поверхні;
- коефіцієнт взаємного перекриття.

Із зменшенням загальної конструктивної жорсткості контактуючих елементів пари тертя коефіцієнт тертя зростає внаслідок збільшення площі фактичного контакту, тобто дієвим засобом зниження жорсткості є розбиття загальної площі на окремі самостійно навантажені елементи.

Висновки

1. Визначення та вибір геометричних характеристик дискових гальм залежить від вантажопідйомності та умов експлуатації, які є важливими факторами, що необхідно враховувати на початковому етапі проектування, поряд з типом матеріалу виготовлення.

2. Фізичні, механічні та хімічні властивості використовуваних матеріалів впливають на поведінку та ефективність гальмування. Крім режиму експлуатації, на

тривалість використання гальмівних дисків впливає і нормальна робота всіх найближчих вузлів (чи не зношені гальмівні колодки, правильно працює супорт, відсутність корозії на ступиці, відбалансування коліс, амортизаторів і передньої вісі).

3. У більшості випадків конструкції дискових гальм повинні виключати перегрів між диском і колодкою через тертя в процесі гальмування.

4. Основні принципи роботи дискових фрикційних гальм визначаються теорією сухого тертя. На основі теорії тертя, розрахунково-експериментальних досліджень та досвіду експлуатації визначено, що за температурними навантаженнями та зносом при гальмуваннях у найбільш жорстких умовах знаходяться деталі пари тертя. З боку вчених, які проводили дослідження в галузі вдосконалення дискового гальма, приділено особливу увагу обґрунтуванню вибору фрикційних матеріалів та конструктивних рішень щодо розробки деталей та вузлів пар тертя.

Список використаних джерел

1. Байцур М. В. Поліпшення гальмівних властивостей автомобілів категорії N3 при їх конверсії: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.22.02 «Автомобілі та трактори». Харків, 2007. 22 с.
2. Deo A., Palade V., Huda M.N. Centralised and decentralised sensor fusion-based emergency brake assist. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 5422. <https://doi.org/10.3390/s21165422>.
3. Подригало М. А., Коробко А. І. Вплив бортової нерівномірності гальмівних сил на відхилення автомобіля. *Автомобильный транспорт*. Харків. ХНАДУ. 2009. № 24. С. 33–36.
4. Chen C., Xu J., Yuan X., Wu X. Characteristic analysis of the peak braking force and the critical speed of eddy current braking in a high-speed maglev. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 2622. <https://doi.org/10.3390/en12132622>.
5. Fyhr P., Henderson L. A more efficient braking system for heavy vehicles. Paper presented at Resource Efficient Vehicles Conference, rev 2021, Virtual, Sweden.
6. García-León R.A., Flórez-Solano E., Suárez-Quiñones Á. Brake Discs: a technological review from its analysis and assessment. *Inf. Técnico*. 2019. Vol. 83(2). P. 217–234. DOI: 10.23850/22565035.1766.
7. Wu X., Fu S. Research on Safe Following Distance on an Expressway Based on Braking Process Analysis. *Appl. Sci*. 2023. Vol. 13. P. 1110. <https://doi.org/10.3390/app13021110>.
8. Vytenis Surblys, Edgar Sokolovskij Research of the Vehicle Brake Testing Efficiency. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 134. P. 452–458.
9. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.
10. Yan, H.B., Feng, S.S., Yang, X.H. and Lu, T.J., Role of cross-drilled holes in enhanced cooling of ventilated brake discs. *Appl. Therm. Eng.* 2015. Vol. 91(1). P. 318-333. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.042.
11. Jegadeeshwaran R., Sugumaran V. Brake fault diagnosis using Clonal Selection Classification Algorithm (CSCA) – A statistical learning approach, *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015. Vol. 18. Issue 1. P. 14–23.
12. Pranta M.H., Rabbi M.S., Banik S.C., Hafez M.G., Chu Yu-Ming. A computational study on structural and thermal behavior of modified disk brake rotors, *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Volume 61. Issue 3. P. 1882-1890.
13. Вольченко Д. О. Наукові основи керування зносо-фрикційними властивостями металополімерних пар тертя гальм для недопущення

термостабілізаційного явища: дис. докт. техн. наук: 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. Київ, 2012. 424 с.

14. Baker L. J., Parker J. D., Daniel S. R. The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. Vol. 143-144. P. 442–447.

15. Krauser R., Kohlgruber K. Temperaturberechnung in Scheibenbremsen. *Automobile Industrie*, 4/1976. P. 37–48.

16. Meng Y, Xu J, Ma L et al. A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*. 2022. Vol. 10(10). P. 1443–1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>.

17. Belhocine A. Numerical investigation of a three-dimensional disc-pad model with and without thermal effects. *Thermal science*. 2015. Vol. 19. № 6. P. 2195–2204.

18. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. ISBN 978-83-66567-13-9. pp. 162.

19. Rogovskii I. L. Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155–162. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.155-162>.

References

1. Baytsur M.V. (2007). Improvement of braking properties of cars of category N3 during their conversion: autoref. thesis for obtaining sciences. stupa Ph.D. Technical Sciences: specialist 05.22.02 "Cars and tractors". Kharkiv. 22 p.

2. Deo A., Palade V., Huda M.N. (2021). Centralised and decentralised sensor fusion-based emergency brake assist. *Sensors*. Vol. 21. P. 5422. <https://doi.org/10.3390/s21165422>.

3. Podrigalo M.A., Korobko A.I. (2009). Influence of on-board unevenness of braking forces on vehicle deflection. *Automobile transport*. Kharkiv. No. 24. P. 33–36

4. Chen C., Xu J., Yuan X., Wu X. (2019). Characteristic analysis of the peak braking force and the critical speed of eddy current braking in a high-speed maglev. *Energies*. Vol. 12. P. 2622. <https://doi.org/10.3390/en12132622>.

5. Fyhr P., Henderson L. (2021). A more efficient braking system for heavy vehicles. Paper presented at Resource Efficient Vehicles Conference. Virtual, Sweden.

6. García-León R.A., Flórez-Solano E., Suárez-Quiñones Á. (2019). Brake Discs: a technological review from its analysis and assessment. *Inf. Técnico*. Vol. 83(2). P. 217–234. DOI: 10.23850/22565035.1766.

7. Wu X., Fu S. (2023). Research on safe following distance on an expressway based on braking process analysis. *Appl. Sci*. Vol. 13. P. 1110. <https://doi.org/10.3390/app13021110>.

8. Vytenis Surblis, Edgar Sokolovskij. (2016). Research of the vehicle brake testing efficiency. *Procedia Engineering*. Vol. 134. P. 452–458.

9. Zakalov O.V., Zakalov I.O. (2011). Basics of friction and wear in machines: tutorial. Ternopil Ivan Pulyuy Publishing House of TNTU. 322 p.

10. Yan H.B., Feng S.S., Yang X.H., Lu T.J. (2015). Role of cross-drilled holes in enhanced cooling of ventilated brake discs. *Appl. Therm. Eng.* Vol. 91(1). P. 318–333. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.042.

11. Jegadeeshwaran R., Sugumaran V. (2015). Brake fault diagnosis using Clonal Selection Classification Algorithm (CSCA) – A statistical learning approach, *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Volume 18. Issue 1. P. 14–23.

12. Pranta M.H., Rabbi M.S., Banik S.C., Hafez M.G., Chu Yu-Ming. (2022). A computational study on structural and thermal behavior of modified disk brake rotors, Alexandria Engineering Journal. Volume 61. Issue 3. P. 1882–1890.
13. Volchenko D. O. (2012). Scientific basis of control of wear-friction properties of metal-polymer friction pairs of brakes to prevent thermal stabilization phenomenon: thesis. dr. technical Sciences: 05.02.04 - friction and wear in machines. Kyiv. 424 p.
14. Baker L. J., Parker J. D., Daniel S. R. (2003). The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 143–144. P. 442-447.
15. Krauser R., Kohlgruber K. (1976). Temperaturberechnung in Scheibenbremsen. Automobile Industrie, 4/1976. P. 37–48.
16. Meng Y, Xu J, Ma L. (2022). A review of advances in tribology in 2020–2021. Friction. Vol. 10(10). P. 1443–1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>.
17. Belhocine A. (2015). Numerical investigation of a three-dimensional disc-pad model with and without thermal effects. Thermal science. Vol. 19. № 6. P. 2195-2204.
18. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9; pp. 162.
19. Rogovskii I. L. (2020). Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11 (1). P. 155–162. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.155-162>.