

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

**КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ  
ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ  
ЗДАТНИХ ВПЛИВАТИ НА ЇХ  
ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

<https://doi.10.5281/zenodo.15427846>

УДК 629.4

*Загурський А.О. Конструктивні особливості гальмівних колодок сільськогосподарської техніки здатних впливати на їх ефективність за різних режимів експлуатації.*

**Анотація.** Гальмівна колодка є одним з ключових компонентом безпеки як пасажирів так і вантажів. Вона відіграє вирішальну роль в управлінні автотранспортними засобами та обладнанням машин, а її конструктивні особливості визначають ефективність гальмування, довговічність, екологічність та безпеку транспортного засобу. Трибологічні характеристики дискових гальм значною мірою залежать від конструкції та матеріалів з яких виготовлені гальмівні диски й колодки та коефіцієнту тертя, що виникає між ними. Останній суттєво залежить від температури та стану поверхні тертя. При надмірному нагріванні (наприклад, при інтенсивному гальмуванні) виникає ефект вигорання фрикційного матеріалу, що призводить до втрати коефіцієнта тертя та зниження ефективності гальмування. В роботі теоретично обґрунтовано залежність гальмувань від температурних режимів експлуатації гальмівної системи автотранспортних засобів. Досліджено ефективність роботи удосконаленої гальмівної колодки 2TP-114 Tr108 R3 за різних температурних режимів та проведено порівняння її показників із трьома іншими зразками гальмівних колодок, які використовуються у автотранспортних засобах України. Результати тестів проведених на інерційному динамометричному стенді TecSA TTR2600 ТОВ «БЦЗ «Трібо» згідно ISO 26866:2009 засвідчили, що запропонований зразок гальмівної колодки успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати (у тестах на ефективність гальмування зі зміною температур та швидкості показав стабільне 2 місце) поступаючись за окремими показниками лише зразку «2». Причому у тесті на припрацювання для виходу на стабільний гальмівний момент йому знадобилося найменша кількість гальмувань, що свідчить про його переваги при притиранні нових колодок до диску при їх заміні, що може бути використано при сервісному обслуговуванні автотранспортних засобів.

**Ключові слова:** зносні гальмування, коефіцієнт тертя, притирання, температурні режими, трибологічні характеристики, фрикційні матеріали.

*Zagurskiy A.O. Design features of brake pads of agricultural machinery that can affect their efficiency under different operating conditions.*

**Abstract.** The brake pad is one of the key components of the safety of both passengers and cargo. It plays a crucial role in the management of motor vehicles and machine equipment, and its design features determine the braking efficiency, durability, environmental

*friendliness and safety of the vehicle. The tribological characteristics of disc brakes largely depend on the design and materials from which the brake discs and pads are made and the friction coefficient that occurs between them. The latter significantly depends on the temperature and condition of the friction surface. With excessive heating (for example, during intensive braking), the effect of burnout of the friction material occurs, which leads to a loss of the friction coefficient and a decrease in braking efficiency. The work theoretically substantiates the dependence of braking on the temperature conditions of operation of the brake system of motor vehicles. The efficiency of the improved brake pad 2TP-114 Tr108 R3 under different temperature conditions was investigated and its performance was compared with three other brake pad samples used in Ukrainian vehicles. The results of tests conducted on the TecSA TTR2600 inertial dynamometer of LLC "BCZ "Tribo" according to ISO 26866:2009 showed that the proposed brake pad sample successfully passed the test and, in comparison with the other three samples, showed good results (in tests for braking efficiency with changes in temperature and speed, it showed a stable 2nd place), inferior in individual indicators only to sample "2". Moreover, in the running-in test, it required the least number of braking operations to reach a stable braking torque, which indicates its advantages when lapping new pads to the disc when replacing them, which can be used in vehicle service.*

**Key words:** wear braking, friction coefficient, lapping, temperature regimes, tribological characteristics, friction materials.

### Постановка проблеми

Гальмівна система є одним з найбільш важливих компонентів сучасних автомобілів з точки зору безпеки. При гальмуванні складові гальмівної системи (колодки та дискове гальмо) входять у трибологічний або ковзний фрикційний контакт через який автомобіль уповільнює рух, а зрештою і зупиняється. У наслідок тертя та перетворення кінетичної енергії генерується тепло, яке сприяє підвищенню температури до критичних значень дозволених для експлуатації матеріалів гальмівних механізмів. Це може призвести до небажаних наслідків, таких як вицвітання гальм, локальних задирів, термоеластичної нестабільності, термічних тріщин та відповідно передчасного зношування або руйнування компонентів гальмівної системи.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Результати нагрівання пар тертя у процесі експлуатації автотранспортних засобів та їх вплив на ефективність гальмування відображені як у вітчизняних так і зарубіжних дослідженнях. Зносостійкість гальмівних механізмів та ефективність гальмувань за підвищених температур розглянуто у роботах О.В. Бевза, С.О. Магопця та О.О. Матвієнко [1], А. Белхочін, та М. Бушетари [3], М. Кіндрачука, Д. Волченко, Н. Фідровської, О. Духоти, Д. Журавльова, М. Осташук, Ю. Пороховського та В. Харченко [10], Д. Карлевариса, М. Леонарді, Дж. Страффеліні, С. Джаланелла [5] та інших науковців.

Вплив різних інгредієнтів композицій фрикційного матеріалу гальмівних колодок на ефективність процесу гальмування досліджують Ж. Готьє ді Контъенго та М.Г. Фага [7], А.Р. Іраван, Д.Ф. Фітріяна, К. Тезара, Дж.Р. Сірегар, Д. Лакшмідеві, Г.Д. Баскара, М.З. Абдулла, Р. Джунід, А.Е. Хаді, та М.Х.М. Хамдан [9], А. Сінха., Г. Іскья, К. Менапейс, і С. Джаланелла [17] та інші дослідники.

А зважаючи на те, що завжди існує потреба в застосуванні нових матеріалів з покращеними властивостями, ніж у існуючих, сучасні гальмівні колодки продовжують удосконалювати як з погляду матеріалів так і конструкції. Тому все більше науковців та

практиків [6, 15, 19] для підвищення стійкості гальмівних колодок пропонують при їх виробництві застосовувати так званий скорчинг (короточасне нагрівання поверхні гальмівних колодок до 600-800 °С). Такий підхід дає можливість запобігати падінню ефективності гальмівної системи за високих температур та сприяти проведенню нових досліджень з пошуку більш досконалих конструкцій та матеріалів для підвищення ефективності гальмівних систем.

### **Формулювання мети досліджень**

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та практичне дослідження впливу конструкції та складу гальмівної колодки на ефективність гальмівних моментів за різних режимів експлуатації гальмівної системи автотранспортних засобів.

### **Методичний підхід в проведенні досліджень**

Як основний компонент гальмівної системи автомобіля, гальмівні колодки мають складну структуру та високу частоту відмов. Вони зазвичай вирішують низку практичних проблеми, таких як ефективність гальмування, шум гальмування, розсіювання тепла тощо [16]. Точний та ефективний моніторинг їх стану може допомогти оцінити безпеку та уникнути аварій, спричинених відмовою гальм. Проте процес зносу автомобільних гальмівних колодок є поступовою, нелінійною і нестаціонарною системою, що змінюється в часі, і не має фіксованого життєвого циклу, до того ж його особливості важко передбачити. У багатьох випадках він залежить від конструктивних особливостей та матеріалів з яких вироблені гальмівні колодки.

Конструктивно гальмівні колодки складаються з декількох шарів: адгезив, який утримує фрикційний матеріал на інших шарах, забезпечується підшаром, який розміщується між фрикційним матеріалом та задньою пластиною; задня пластина надає гальмівним колодкам необхідну жорсткість і дозволяє їм продовжувати рухатися напрямним супортом; фрикційний матеріал, що знаходиться у безпосередньому контакті з диском під час процесу гальмування.

Основним компонентом, що відповідає за тертя колодки з гальмівним диском є фрикційний матеріал. Він суттєво впливає на ефективність гальмування автомобіля, особливо в умовах жорсткого гальмування, за якого температура гальмівної системи піднімається вище за критичне значення. [14]. Фрикційний матеріал складається з різних інгредієнтів, кожен з яких розроблений для певних застосувань [2;8;12] і може мати різні комбінації цих компонентів, залежно від їх призначення та вимог до експлуатації. Зазвичай фрикційні матеріали для виготовлення гальмівних накладок являють собою композитиви, що утворені шляхом гарячого пресування грубих порошків, які включають багато різних компонентів (10 і більше), а саме: сполучну речовину, яка утримує інші компоненти разом і утворює термостабільну матрицю (використовуються термореактивні фенольні смоли, часто з додаванням каучуку для поліпшення демпфуючих властивостей); конструкційні матеріали, що забезпечують механічну міцність (металеві, мінеральні і керамічні волокна, скляні та/або кевларові волокна, рідше різні вуглецеві волокна); наповнювачі, в основному для зниження вартості, але також і для покращення технологічності (часто використовуються різні мінерали, такі як слюда та вермікуліт); фрикційні добавки, що додаються для забезпечення стабільних фрикційних властивостей та контролю швидкості зносу як колодки, так і диска (тверді мастильні матеріали, такі як графіт та різні сульфідні металів). Трибологічні та емісійні характеристики дискових гальм значною мірою

залежать від характеристик контактної поверхні дисків і колодок та коефіцієнту тертя, що виникає між ними.

Причому до останніх висувається ціла низка вимог:

- високий динамічний коефіцієнт тертя, який має залишатися стабільним не залежно від температури, тиску та швидкості ковзання;
- висока зносостійкість і міцність (повинні витримувати кутову швидкість, що вдвічі перевищує максимальну кутову швидкість двигуна без руйнування);
- плавне та пропорційне стиснення;
- збільшення сили тертя;
- достатня термостійкість і теплопровідність (температура колодок не має перевищувати 200°C при тривалій експлуатації та 350°C при короткочасній експлуатації) [10].

Разом тим за визначенням Г. Страффеліні [18] сила є функцією часу або відстані ковзання. Вона демонструє початковий перехідний режим з лінійною поведінкою до досягнення піку. За ним слідує режим стійкого стану, що відповідає стабілізації сили тертя. Пік наприкінці перехідного режиму відповідає коефіцієнту статичного тертя, тоді як режим сталого стану пов'язані з коефіцієнтом динамічного тертя [4]. І як зазначають М. Мотта, Л. Федрици та Ф. Андреатта «синергетичний ефект, що існує між різними інгредієнтами та їх впливом на властивості тертя, надзвичайно складний» [13]. Тому у трибологічних системах сила тертя між гальмівним диском та колодкою суттєво залежить від коефіцієнту тертя та силою притискання між ними і визначається за формулою:

$$F_{\text{тертя}} = \mu \times F_{\text{н}}, \quad (1)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт тертя між матеріалом гальмівного диска та колодки (безрозмірна величина, що залежить від матеріалів гальмівного диска і колодки. Зазвичай  $\mu$  для гальмівних систем знаходиться у діапазоні 0,3-0,70). Причому коефіцієнт тертя та питома швидкість зносу зменшуються зі збільшенням контактного тиску та швидкості ковзання [21];

$F_{\text{н}}$  – нормальна сила (сила притискання колодки до диска, яка створюватися за рахунок гідравлічного або механічного приводу в системі гальм), Н.

Сила тертя також залежить від температури (під час роботи коефіцієнт тертя може змінюватися через нагрівання) та стану поверхні (наявність пошкоджень, бруду, води, масла тощо). І практично не залежить від площі контакту гальмівної пари (якщо нормальна сила  $F_{\text{н}}$  і коефіцієнт тертя залишаються незмінними), зміна площі контакту більшою мірою впливає на схильність до шуму [11]. Це пояснюється тим, що зі зменшенням площі контакту, тиск (сила на одиницю площі) зростає, але загальна сила тертя залишається сталою. Проте, зменшення площі контакту може призвести до швидшого нагрівання і зношування матеріалів, оскільки тепло і механічне навантаження концентруються на меншій площі. Це може впливати на коефіцієнт тертя ( $\mu$ ) через перегрівання або зміну стану поверхні та знос гальмівної колодки.

До факторів, що найбільше впливають на знос гальмівної колодки С. Ван, З. Ю, Дж. Ван, С. Чен [20] відносять: стиль водіння (агресивне гальмування призводить до швидшого зносу), тип покриття доріг (їзда по гірських дорогах чи нерівностях збільшує навантаження на гальмівну систему), тягові характеристики автомобіля (важчі автомобілі зношують колодки та диски швидше), матеріали з яких виготовлені колодки (якісні матеріали зазвичай служать довше), стан гальмівної системи (нерівномірний знос може свідчити про проблеми з супортами чи іншими компонентами) тощо.

## Результати досліджень

Відповідно нерівномірний розподіл навантаження може викликати нерівномірне зношування гальмівної колодки чи диска, що у свою чергу вплине на ефективність та довговічність гальмівної системи. За таких обставин на диску утворюються борозди (рис. 1 а), які призводять до менш щільного контакту колодки з диском у разі заміни останньої (адже середній час експлуатації гальмівної колодки практично у двічі менший ніж у диска) та прискореного руйнування країв нової гальмівної колодки під час експлуатації гальмівної системи (рис. 1 б).



Рис. 1. Зношування гальмівної колодки та диска: а) борозди на диску; б) руйнування країв гальмівної колодки.

Джерело: складено автором

Для подолання цих недоліків пропонується використовувати колодку, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса), який гасить вібрації та попереджає можливе руйнування фрикціону на початку робочого циклу й додатковий адаптаційний шар, що сприяє швидкому припрацюванню колодки до гальмівного диска (рис. 2).



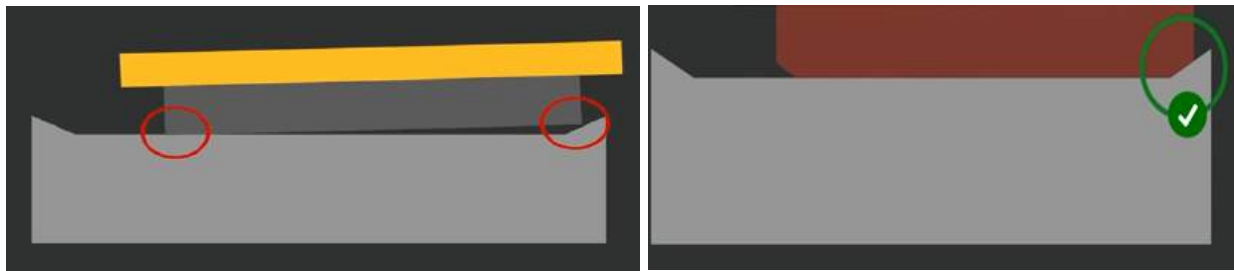
Рис. 2. Зразок удосконаленої гальмівної колодки 2TP-114 Tr108 R3.  
Джерело: ТОВ «БЦЗ«Трібо» UR. <https://www.tribo.ua>

Тепер при технічному регламенті та заміні таких колодок у гальмівній системі, що перебуває у експлуатації між колодкою та гальмівним диском не виникає зазору, як при застосуванні традиційних гальмівних колодок (рис 3 а) і утворюється більш щільний контакт (рис 3 б), а відповідно і вищий гальмовий момент, який розраховується за формулою:

$$M=F \times R, \quad (2)$$

де:  $F$  – гальмівна сила з якою колодки притискаються до диска (визначається гідравлічним тиском в системі,  $H$ ),

$R$  – ефективний радіус дії гальмівної сили.



а

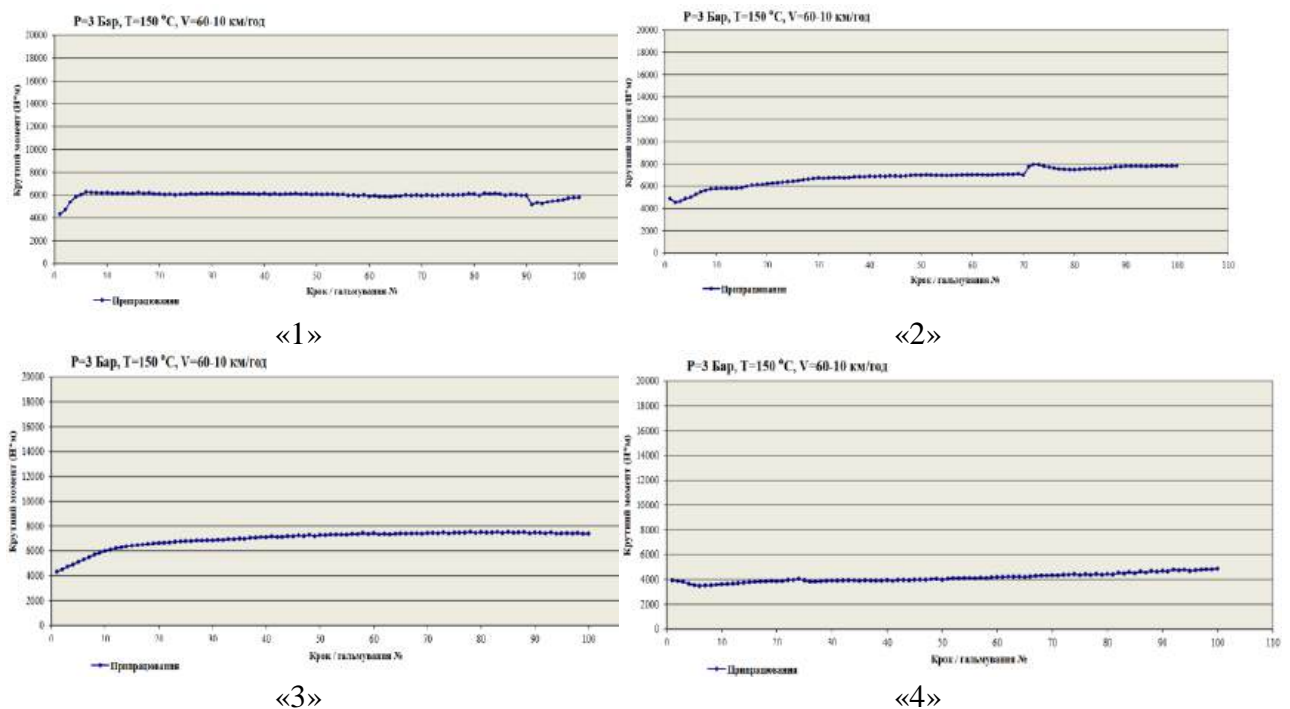
б

Рис. 3. Контакт нової удосконаленої колодки та зношеного диска: а) контакт традиційної колодки та зношеного диска б) контакт удосконаленої колодки та зношеного диска.

Джерело: складено автором

Таким чином гальмівні колодки з покрашеною геометрією у вигляді скошеного (краю-конуса) можуть стати ідеальним варіантом для встановлення на гальмівні диски що були у використанні.

Для перевірки ефективності роботи гальмівної колодки 2TR-114 Tr108 R3 було проведено низку тестів запропонованого зразка «1» та трьох інших («2», «3» та «4») зразків гальмівних колодок. Випробування проводилося на інерційному динамометричному стенді ТесСА ТТR2600 ТОВ «БЦЗ«Трібо» згідно ISO 26866:2009 і складалося з низки тестів (на припрацювання, на залежність ефективності гальмувань при зміні температур та швидкості руху)



«1»

«2»

«3»

«4»

Рис. 4. Результати тестування, у фазі припрацювання.

Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

Тест на припрацювання колодок до диска. Під час припрацювання колодки не тільки набувають форми поверхні гальмівного диска, але й іншої хімічної структури, яка дуже важлива для її нормальної роботи. При неправильному притиранні колодки до диска можливе утворення глянцевого шару або руйнування фрикційної маси через перегрівання.

За результатами тестування, у фазі припрацювання (рис. 4) найвищий гальмівний момент показав зразок «2» (700-800 н×м). Зразки «1» та «3» теж показали хороший результат – гальмівний момент 600 і 700 н×м відповідно. Стосовно показників зразка «4» то гальмівний момент низький і лише після 80 гальмування долає позначку 400 н×м. Щодо виходу на стабільний гальмівний момент то тут слід відзначити, що зразок «4» досягає свого невисокого гальмівного моменту одразу з першого гальмування. Зразку «1» для виходу на стабільне «плато» знадобилося 6-8 гальмувань. Зразки «2» та «3» притираються повільно, їм для виходу на стабільний гальмівний момент потрібно близько 20 гальмувань. Це може свідчити про переваги зразка «1», у вигляді скошеного (краю-конуса)), що сприяють швидкому притиранню нових колодок до диска при їх заміні.

2. Тест на залежність ефективності гальмувань при зміні температур та швидкості руху.

а) зносні гальмування на швидкості 10-60 км/год (рис. 5) показують, що збільшення температури погіршує ефективність гальмівних колодок через зменшення тертя та підвищення зносу.

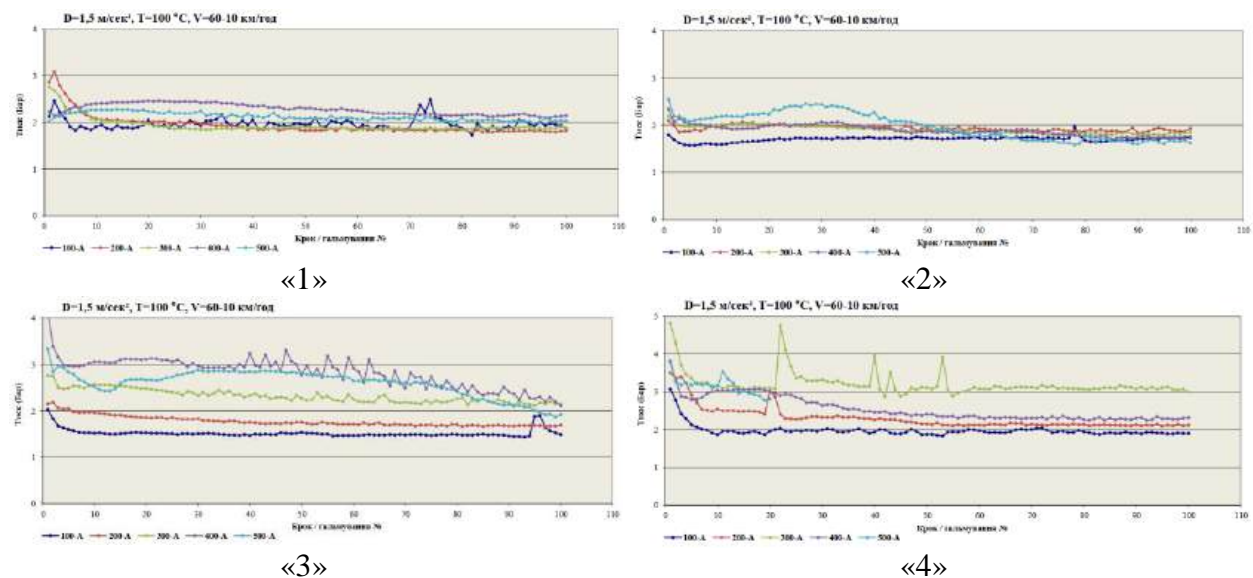


Рис. 5. Результати зносних гальмувань на швидкості 10-60 км/год.

Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

За результатами тестування зразок «1» показав помірну стійкість системи до підвищення температури, але з втратами ефективності на початку роботи (перші 10 гальмувань спостерігається різке зниження ефективності, особливо за високих температур). Далі ефективність стабілізується і залежить від температури (за високих температур 300-400° ефективність знову погіршується).

Ефективність зразка «2» виявилася найкращою. Знос колодок, а отже, і втрата ефективності, зростає повільніше ніж у інших зразків, навіть за високих температур. Температура в цьому випадку не так сильно впливає на деградацію матеріалу колодки, що вказує на високу термостійкість зразка.

Для зразка «3» характерні помітні коливання ефективності при високих температурах, особливо ближче до середини та кінця експлуатації. Втрата ефективності посилюється з часом, що може бути наслідком зношування матеріалу через нагрівання. За низьких температур ефективність більш стабільна, що свідчить про чутливість зразка до нагріву та швидкості.

У зразка «4» вже на початкових етапах спостерігається суттєва втрата ефективності, особливо за високих температур. Ефективність зразка нестабільна і зменшується до кінця випробувань. Висока температура сильно впливає на матеріал, що знижує його стійкість і ефективність.

Отже тест на зносні гальмування при швидкості 10-60 км/год засвідчив, що найкращі показники спостерігаються у зразка «2», а найбільш негативно підвищення температури вплинуло на зразки «3» та «4», які демонструють нестабільність і високі втрати ефективності. Зразок «1» показав середні значення.

б) зносні гальмування на швидкості 50-100 км/год (рис. 6) засвідчують, що температура нагрівання у поєднанні із зростанням швидкості суттєво впливає на характеристики колодок, викликаючи термічну деградацію менш стійких матеріалів.

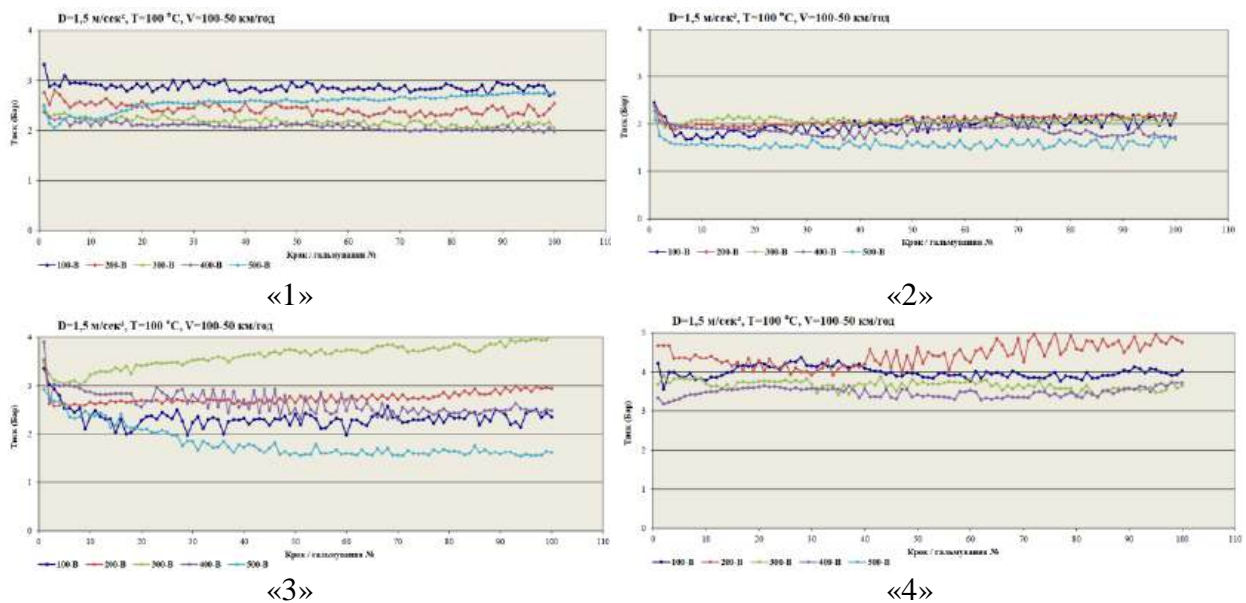


Рис. 6. Результати зносних гальмувань на швидкості 10-60 км/год.

Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

За результатами випробувань при збільшенні швидкості зразок «1» показав стабільні результати у всіх температурних діапазонах. За температури 400 °C спостерігається ріст гальмівного моменту, який пов'язаний з окисненням сульфідів, що використовувалися при виготовленні колодки. Просадка гальмівного моменту після 500 °C в порівнянні з початковими фазами не суттєва, що свідчить про те що колодку можна безпечно використовувати навіть за таких високих температур.

Зразок «2» теж підтвердив свою високу ефективність. Він має досить стабільний гальмівний момент протягом всього тесту. Добре витримав вплив температури 500°C і не втратив ефективності.

Зразок «3» показав хороші результати за невисоких температур – 100-200°C та добре витримав вплив найбільшої температури 500°C за яких не втратив ефективності. При температурах 300-400°C являються варіації, ріст і падіння ефективності.

Зразок «4» показав найнижчі, найбільш нестабільні результати. Колодка не

втримує підвищення температур. Відсутній гальмівний момент після підвищення температури до 500°C бо на фазі 500°C колодка зносилася остаточно. Таку колодку використовувати може бути небезпечно.

Отже тест на зносні гальмування при підвищенні швидкості до 50-100 км/год підтвердив попередні висновки. Найкращі показники та стабільні демонструють зразки «2» та «1», а найбільш негативно підвищення температури вплинуло на зразок «4», які не тільки втратив ефективність, але й був зруйнований при температурі 500°C

Загалом зазначаємо, що запропонований зразок удосконаленої гальмівної колодки 2TP-114 Tr108 R3, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса) й додатковий адаптаційний шар успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати.

Такі колодки рекомендуються для встановлення на вантажні автомобілі з підвищеним тоннажем та на ті автомобілі, що активно експлуатуються в місцевості з із пересіченим рельєфом, а також при заміні колодок при сервісному обслуговуванні.

### Висновки

1. Гальмівні системи є важливими механізмами, що забезпечують безпеку руху автотранспортних засобів. Вони мають складну структуру та підпорядковані силам тертя, які виникають між гальмівним диском та колодкою при гальмуванні, що призводять до їх передчасного зносу. Процес зносу гальмівних колодок є поступовою, нелінійною і нестационарною системою, що змінюється в часі та не має фіксованого життєвого циклу і який важко передбачити. У багатьох випадках він залежить від конструктивних особливостей та матеріалів з яких вироблені гальмівні колодки.

2. В роботі досліджено ефективність роботи удосконаленої гальмівної колодки 2TP-114 Tr108 R3 за різних температурних режимів та проведено порівняння її показників із трьома іншими зразками гальмівних колодок, які використовуються у автотранспортних засобах України.

3. Результати тестів засвідчили, що запропонований зразок гальмівної колодки 2TP-114 Tr108 R3, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса), який гасить вібрації та попереджає можливе руйнування фрикціону на початку робочого циклу й додатковий адаптаційний шар, що сприяє швидкому припрацюванню колодки до гальмівного диска успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати (у тестах на ефективність гальмування зі зміною температур та швидкості показав стабільне 2 місце) поступаючись за окремими показниками лише зразку «2». Причому у тесті на припрацювання для виходу на стабільний гальмівний момент йому знадобилося найменша кількість (близько 20) гальмувань, що свідчить про переваги запропонованого зразка у бистрому притиранні нових колодок до диску при їх заміні, що може бути використано при сервісному обслуговуванні автотранспортних засобів.

### Список використаних джерел

1. Бевз О. В., Магопєць С. О., Матвієнко О. О. Дослідження характеристик гальмівного механізму автомобіля Hyundai Accent. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький. ЦНТУ. 2019. Вип. 1 (32). С. 68–78.

2. Arman M., Singhal S., Chopra P., Sarkar M. A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. Materials Today Proceedings. 2018. Vol. 5(14-2). P. 28305–28312. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.114.

3. Belhocine A., Bouchetara M. Temperature and thermal stresses of vehicles gray cast brake. *Journal of applied research and technology*. 2013. Vol. 11. P. 674–682. 10.1016/S1665-6423(13)71575-X.
4. Blau P.J. Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. *Energy*. 2001. Vol. 27. P. 38.
5. Carlevaris D., Leonardi M., Straffelini G., Gialanella S. Design of a friction material for brake pads based on rice husk and its derivatives. *Wear*. 2023. Vol. 526-527. P. 204893. Doi: 10.1016/j.wear.2023.204893.
6. Deng P., Li P., Xiao P., Li Z., Li J., Chen P., Liu P., Li F. Oxidation behaviour of C/C–SiC brake discs tested on full-scale bench rig, *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 24. P. 34783–34793.
7. Gautier di Confiengo G., Faga M.G. Ecological transition in the field of brake pad manufacturing: an overview of the potential green constituents. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 2508. doi: 10.3390/su14052508.
8. Ige O.E., Freddie I.L., Adewumi G. Biomass-based composites for brake pads: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10(3). P. 920–943. <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3>.
9. Irawan A.P., Fitriyana D.F., Tezara C., Siregar J.P., Laksmidewi D., Baskara G.D., Abdullah M.Z., Junid R., Had A.E., Hamdan M.H.M. Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 1180. doi: 10.3390/polym14061180.
10. Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovskaya N., Dukhota O., Zhuravlev D., Ostashuk M., Porokhovskiy Y., Kharchenko V. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4(12 (124)). P. 56–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699>.
11. Kim J. W., Joo B. S., Jang H. The effect of contact area on velocity weakening of the friction coefficient and friction instability: A case study on brake friction materials, *Tribology International*. 2019. Vol. 135. P. 38–45.
12. Kumar V.V., Selvaraj S.K. Friction material composite: types of brake friction material formulations and effects of various ingredients on brake performance-a review. *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. P. 2404. doi: 10.1088/2053-1591/ab2404.
13. Motta M., Fedrizzi L., Andreatta F. Corrosion Stiction in Automotive Braking Systems. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3710. <https://doi.org/10.3390/ma16103710>.
14. Mulani S.M., Kumar A., Shaikh H.N.A., Saurabh A., Singh P. K., Piyush Verma C. A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system, *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Part 1. P. 447–454.
15. Nogueira A.P.G., Bagolan P., Leonardi M., Gialanella S., Straffelini G. The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. *Wear*. 2020. Vol. 460-461. P. 203480.
16. Soundarrajan K., Varthanan P. A., Devanand A., Balaji M. V., Nandha P.S., Sivaraman S. Automotive brake pad by using functionally graded hybrid composites and their behaviour. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. P. 318–328.
17. Sinha A., Ischia G., Menapace C., Gialanella S. Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 1102. doi: 10.3390/atmos11101102.
18. Straffelini G. Friction and wear, methodologies for design and control. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 2015. 296 p.

19. Wahlström J., Leonardi M., Tu M., Lyu Y., Perricone G., Gialanella S., Olofsson U. A study of the effect of brake pad scorching on tribology and airborne particle emissions. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 488. <https://doi.org/10.3390/atmos11050488>.
20. Wang S., Yu Z., Wang J., Chen S. Research on CNN-LSTM brake pad wear condition monitoring based on gto multi-objective optimization. *Actuators*. 2023. Vol. 12. P. 301. <https://doi.org/10.3390/act12070301>.
21. Wei L., Choy Y.S., Cheung C.S. A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces, *Tribology International*. 2019. Vol. 138. P. 99–110.

## References

1. Bevz O. V., Magopets S. O., Matvienko O. O. (2019). Research on the characteristics of the braking mechanism of the Hyundai Accent car. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: scientific collection*. Kropyvnytskyi: TsNTU. Issue 1 (32). P. 68–78.
2. Arman M., Singhal S., Chopra P., Sarkar M. (2018). A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. *Materials Today Proceedings*. Vol. 5(14-2). P. 28305–28312. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.114.
3. Belhocine A., Bouchetara M. (2013). Temperature and thermal stresses of vehicles gray cast brake. *Journal of applied research and technology*. Vol. 11. P. 674–682. 10.1016/S1665-6423(13)71575-X.
4. Blau P.J. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. *Energy*. Vol. 27. P. 38.
5. Carlevaris D., Leonardi M., Straffelini G., Gialanella S. (2023). Design of a friction material for brake pads based on rice husk and its derivatives. *Wear*. Vol. 526-527. P. 204893. Doi: 10.1016/j.wear.2023.204893.
6. Deng P., Li P., Xiao P., Li Z., Li J., Chen P., Liu P., Li F. (2021). Oxidation behaviour of C/C–SiC brake discs tested on full-scale bench rig, *Ceramics International*. Vol. 47. Issue 24. P. 34783–34793.
7. Gautier di Confiengo G., Faga M.G. (2022). Ecological transition in the field of brake pad manufacturing: an overview of the potential green constituents. *Sustainability*. Vol. 14. P. 2508. doi: 10.3390/su14052508.
8. Ige O.E., Freddie I.L., Adewumi G. (2019). Biomass-based composites for brake pads: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. Vol. 10(3). P. 920–943. <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3>.
9. Irawan A.P., Fitriyana D.F., Tezara C., Siregar J.P., Laksmidewi D., Baskara G.D., Abdullah M.Z., Junid R., Had A.E., Hamdan M.H.M. (2022). Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads. *Polymers*. Vol. 14. P. 1180. doi: 10.3390/polym14061180.
10. Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovskaya N., Dukhota O., Zhuravlev D., Ostashuk M., Porokhovskiy Y., Kharchenko V. (2023). Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4(12 (124)). P. 56–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699>.
11. Kim J. W., Joo B. S., Jang H. (2019). The effect of contact area on velocity weakening of the friction coefficient and friction instability: A case study on brake friction materials, *Tribology International*. Vol. 135. P. 38–45.
12. Kumar V.V., Selvaraj S.K. (2019). Friction material composite: types of brake friction material formulations and effects of various ingredients on brake performance-a review. *Materials Research Express*. Vol. 6. P. 2404. doi: 10.1088/2053-1591/ab2404.

13. Motta M., Fedrizzi L., Andreatta F. Corrosion Stiction in Automotive Braking Systems. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3710. <https://doi.org/10.3390/ma16103710>.
  14. Mulani S.M., Kumar A., Shaikh H.N.A., Saurabh A., Singh P. K., Piyush Verma C. (2022). A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system, *Materials Today: Proceedings*. Vol. 56. Part 1. P. 447–454.
  15. Nogueira A.P.G., Bagolan P., Leonardi M., Gialanella S., Straffelini G. (2020). The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. *Wear*. Vol. 460-461. P. 203480.
  16. Soundarrajan K., Varthanan P. A., Devanand A., Balaji M. V., Nandha P.S., Sivaraman S. (2018). Automotive brake pad by using functionally graded hybrid composites and their behaviour. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. Vol. 9. P. 318–328.
  17. Sinha A., Ischia G., Menapace C., Gialanella S. (2020). Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials. *Atmosphere*. Vol. 11. P. 1102. doi: 10.3390/atmos11101102.
  18. Straffelini G. (2015). *Friction and wear, methodologies for design and control*. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 296 p.
  19. Wahlström J., Leonardi M., Tu M., Lyu Y., Perricone G., Gialanella S., Olofsson U. (2020). A study of the effect of brake pad scorching on tribology and airborne particle emissions. *Atmosphere*. Vol. 11. P. 488. <https://doi.org/10.3390/atmos11050488>.
  20. Wang S., Yu Z., Wang J., Chen S. (2023). Research on CNN-LSTM brake pad wear condition monitoring based on gto multi-objective optimization. *Actuators*. Vol. 12. P. 301. <https://doi.org/10.3390/act12070301>.
- Wei L., Choy Y.S., Cheung C.S. (2019). A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces, *Tribology International*. Vol. 138. P. 99–110.