

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.4-592

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.07

## СТАТИЧНИЙ І ДИНАМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ В ПАРАХ ТЕРТЯ ДИСКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ

Фідровська Н. М.<sup>1</sup>, Іваненко О. І.<sup>1</sup>, Баженов В. О.<sup>1</sup>,  
Нікіпчук С. В.<sup>2</sup>, Присяжний А. В.<sup>3</sup><sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка»<sup>3</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Анотація.** Теоретичні та експериментальні дослідження статичного (колишнього спокою) та динамічного коефіцієнтів тертя у фрикційній взаємодії матеріалів ФК-24А – сталь 35ХНЛІ проведено на модельному дисково-колодковому гальмі за умови тривалого режиму гальмування. Водночас установлено в діапазоні реальних імпульсних навантажень, що реалізуються під час гальмування в ділянці контакту фрикційної накладки з гальмівним диском, напружено-деформований стан контакту за критерієм мікродеформації в контакті відповідає пружно-пластичній властивості. Пружні та пластичні властивості матеріалів виявляються тоді, коли в кожному окремому випадку сумарні напруження перевищують межу плинності або досягають її межі. Із зростанням імпульсної сили нормального притискання накладки колодки до бігової доріжки тертя диска статичний коефіцієнт тертя має тенденцію до збільшення, а зі зростанням статичного коефіцієнта взаємного перекриття  $k_{вз.с}$  – тенденцію до зменшення за умови пружно-пластичної властивості матеріалів. У виборі матеріалів пар тертя динамічний коефіцієнт тертя має містити величину статичного коефіцієнта тертя й бути як мінімум на 20 % більшим за розрахункову величину динамічного коефіцієнта тертя. Збільшення статичного та динамічного коефіцієнта тертя в парах тертя дисково-колодкового гальма призводить до зростання пластичної деформації їхніх мікрровиступів. Отримані результати можуть бути використані для проєктування дисково-колодкових гальм.

**Ключові слова:** дисково-колодкове гальмо, пари тертя, пружні та пластичні деформації, статичний і динамічний коефіцієнти тертя.

**Вступ**

Якість і надійність конструкцій створюваних фрикційних вузлів гальмівних пристроїв залежать від інтенсивності процесів, явищ і ефектів, що відбуваються під час фрикційної взаємодії мікрровиступів поверхонь тертя. Контакт мікрровиступів має дискретний характер, його інтенсивність оцінюється динамічним коефіцієнтом взаємного перекриття (запропонував А. І. Вольченко) пар тертя, а величина коливається в межах 0,15–0,75 залежно від типу фрикційного вузла.

На знософрикційні властивості пар тертя модельного дисково-колодкового гальма впливає їхня поверхнева температура, тип контактів мікрровиступів та властивості фрикційно взаємодіючих матеріалів.

**Аналіз публікацій**

Гальмування транспортного засобу реалізується в умовах, коли притискання фрикційних накладок гальмівних колодок до біго-

вої доріжки тертя гальма здійснюється в широкому діапазоні сил і швидкостей відносно-го переміщення елементів тертя [1–4]. У процесі гальмування характеристики тертя дискового гальма змінюються залежно від фрикційних властивостей його робочих елементів, інтенсивності дії навантажувально-швидкісних факторів, а також від рівня теплової енергії, що генерується під час гальмування [5–8].

Характеристикою рівня теплової енергії є поверхнева та об'ємна температури та їхні температурні градієнти, що залежать від кількості підведеної до дискового гальма механічної енергії, фізико-механічних і теплотехнічних властивостей матеріалів елементів тертя та ефективності дисипації енергії в навколишнє середовище [7, 8]. У зв'язку з цим коефіцієнт тертя спокою (надалі статичний коефіцієнт тертя) дискового гальма не відчуває впливу поверхневої температури. Його можна розглядати як характеристику потен-

ційних фрикційних властивостей дискового гальма, що визначають інтенсивність реалізації процесу гальмування [5, 6].

Розглянемо результати експериментального дослідження залежності статичного коефіцієнта тертя, що характеризує потенційні фрикційні властивості дискового гальма від сили притискання фрикційних накладок до гальмівного диска та коефіцієнта взаємного перекриття. Відомо [5, 6], що напружено-деформований стан ділянки контакту елементів тертя можна класифікувати за критерієм мікродеформацій у сфері властивостей матеріалів. Відповідно до цього критерію можна ідентифікувати напружено-деформований стан елементів тертя за трьома видами стану матеріалів:

- пружний (насичений і ненасичений);
- пластичний (ненасичений і насичений);
- за умови якого проявляється інтерференція деформацій мікронерівності.

Залежно від типу контакту (омічного, нейтрального та блокувального [9]) змінюється характеристика тертя. Отримана графічна залежність проходить через мінімум, що відповідає точці переходу переважно пружних деформацій у переважно пластичні деформації мікронерівностей. Максимум статичного коефіцієнта тертя відповідає точці, де починає проявлятися вплив інтерференцій деформацій мікронерівностей.

Значна увага впливу статичного коефіцієнта взаємного перекриття (термін та поняття запропоновані А. В. Чичинадзе) на характер процесу тертя та зносу приділяється в роботах [10, 11 тощо]. Щодо дискових гальм, в яких обидва елементи пари тертя виконані з окремих секторів із розривами на номінальній поверхні тертя, коефіцієнт взаємного перекриття визначається за формулою

$$k_{\text{вз}} = \frac{A_{a_1} A_{a_2}}{A_{\text{ум}}^2},$$

де  $A_{a_1}$  – номінальна поверхня тертя першого елемента;  $A_{a_2}$  – номінальна поверхня тертя другого елемента;  $A_{\text{ум}}$  – умовна контурна поверхня тертя, отримана обертанням елементів пари тертя навколо центрів обертання [12].

Експериментальні дослідження показали, що за інших рівних умов збільшення  $k_{\text{вз}}$  призводить до зростання об'ємної температури, зниження температурного градієнта й динамічного коефіцієнта тертя та збільшення зносу [13].

Аналіз численних досліджень показує, що одним із основних факторів, що викликають зміну динамічного коефіцієнта тертя, а також зносу, є інтенсивність наростання та величина температури, що впливає на процеси, які протікають у поверхневих шарах фрикційних матеріалів [14].

Динамічний коефіцієнт тертя супроводжує процес за умови уповільненого обертання металевого фрикційного елемента, а статичний коефіцієнт тертя (запропонував А. І. Вольченко), – коли він перебуває в спокої.

### Мета та постановка завдання

У цій статті розглянуто такі питання щодо вирішуваної проблеми:

- пружні та пластичні властивості матеріалів мікровиступів пар тертя;
- вплив основних експлуатаційних параметрів на зміну коефіцієнтів тертя;
- обговорення результатів.

Мета – установити закономірності впливу основних експлуатаційних параметрів пар тертя модельного дисково-колодкового гальма на потенційний та кінетичний коефіцієнти тертя.

### Пружні та пластичні властивості матеріалів мікровиступів пар тертя

Значний експериментальний матеріал, накопичений за фактичною площею контакту (ФПК), дозволяє виділити найбільш характерні особливості процесу їхнього формування, що зводяться до таких положень:

1) контакт шорстких поверхонь має дискретний характер;

2) елементарні контакти (фактичні плями контакту) виникають унаслідок як пружних, так і пластичних деформацій матеріалів;

3) ФПК  $A_r$  і діюча імпульсна навантаження пов'язані співвідношенням  $A_r = \text{const } N^n$ , де  $n = 1$  за умови пластичного контакту та наближено до 1 ( $n \approx 0,8 \div 0,9$ ) у разі пружного;

4) із зростанням імпульсного навантаження збільшення площі фактичного контакту відбувається найчастіше за рахунок виникнення нових плям контакту. У цьому випадку середній розмір плями залишається майже постійним.

У процесі пружної деформації відбувається відтиснення матеріалу виступами контртіла, що має хвильову природу, з різною амплітудою в той момент, коли навантаження, що діє, не призводить до виникнення в зоні

контакту сумарних напружень, що перевищують межу плинності.

Пластичне відтиснення матеріалу відбувається, якщо контактні сумарні напруження досягають межі плинності, але матеріал обтікає виступи контргіла, що впровадилися, змінюючи та зрізаючи їх під основу.

Надалі об'єм матеріалу, що з'явився, заповнює мікроотвори між виступами й формує пластичні шари.

У процесі пластичної деформації із збільшенням густини дислокацій частина дислокацій витискається з площини ковзання. Дислокації протилежних знаків під час зустрічі анігілюють (знищуються). Густина дислокацій зменшується. Одночасно утворюються мікротріщини, які руйнують кристал, що визначає величину пластичної деформації матеріалу.

Відомо [5, 6], що напружено деформований стан елементів тертя можна класифікувати за критерієм мікродеформацій у зоні контакту. Відповідно до цього критерію можна ідентифікувати напружено-деформований стан елементів тертя за трьома станами матеріалів: пружністю, пластичністю та проявом інтерференції деформації.

Залежно від типу контакту змінюються характеристики електротермомеханічного тертя. На рис. 1 зображена класична закономірність зміни динамічного коефіцієнта тертя залежно від імпульсних питомих навантажень, які є прямим наслідком впливу імпульсного рівня нормального навантаження притискання накладки до гальмівного диска. Зона *a* належить до пружного стану (омічний контакт), зона *b* – до пластичного стану (нейтральний або блокувальний контакт), зона *c* – до пружного стану (блокувальний контакт).

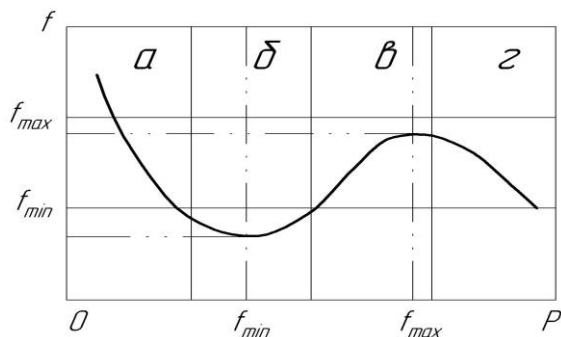


Рис. 1. Закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя ( $f$ ) від імпульсних питомих навантажень ( $p$ ) в ділянці контакту

Залежність, наведена на рис. 1, проходить через мінімум, що відповідає точці переходу переважно пружних деформацій у переважно пластичні деформації мікронерівностей. Максимум статичного коефіцієнта тертя відповідає точці, в якій починає проявлятися вплив інтерференції деформацій мікронерівностей.

У виборі матеріалів пар тертя динамічний коефіцієнт тертя має включати величину статичного коефіцієнта тертя й бути як мінімум на 20 % більшим за розрахункову величину динамічного коефіцієнта тертя.

За результатами вимірів графічно побудовано залежність статичного коефіцієнта тертя  $f_c$  від імпульсної нормальної сили  $F$  притискання накладки до гальмівного диска. Результати експериментів наведено на рис. 2.

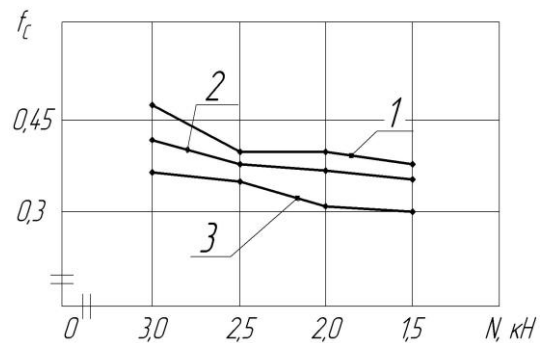


Рис. 2. Залежність статичного коефіцієнта тертя  $f_c$  від нормальної імпульсної сили притискання  $N$  накладки колодки до гальмівного диска для пари тертя ФК-24 – сталь 35ХНЛ за умови різних статичних коефіцієнтів взаємного перекриття  $k_{вз.с.}$ : 1 – 0,15; 2 – 0,2; 3 – 0,25

З наведених результатів випливає, що зниження статичного коефіцієнта тертя у всьому діапазоні імпульсних нормальних сил, які реалізуються, притискання  $N$  однозначно вказує на те, що напружено-деформований стан робочих елементів дисково-колодкового гальма під час силової взаємодії відповідає пластичному стану за умови  $N = (3,0-2,5)$  кН, а пружного стану, якщо  $N = (2,0 - 1,5)$  кН для пари тертя ФК-24А – сталь 35ХНЛ.

Зі зростанням статичного коефіцієнта взаємного перекриття  $k_{вз.с.}$  за інших рівних умов спостерігається збільшення статичного коефіцієнта тертя, що найімовірніше пояснюється збільшенням імпульсних питомих навантажень у ділянці пластичного контакту пари тертя.

### Вплив основних експлуатаційних параметрів пар тертя на зміну коефіцієнтів тертя

У полімерних накладках, що містять неоднорідні матеріали, існують аморфні та кристалічні фази, виникає захоплення іншого роду – на міжфазних границях. Накопичення зарядів на границях обумовлено різницею у провідності аналізованих фаз (ефект Максвелла – Вагнера). За умови електризації такого матеріалу носії будуть збиратися поблизу міжфазної границі або, навпаки, виходити з неї залежно від того, який з двох струмів провідності більший за заряди, що протікають до границі, або ті, що виходять з неї. Відмінність у локальних струмах провідності призводить також до дисипації зарядів під час подальшого проведення термостимульованого розряду, оскільки в цьому випадку струми протікають вже в протилежному напрямку.

Для процесів нейтралізації зарядів важливу роль відіграють властивості робочої поверхні металевого фрикційного елемента. Взаємозв'язок між енергетичними рівнями визначається за допомогою фрикційної контактної взаємодії мікроставувань пар тертя. На рис. 3, а, б, в умовно показано різницю між нейтральним, омичним і блокувальним контактами.

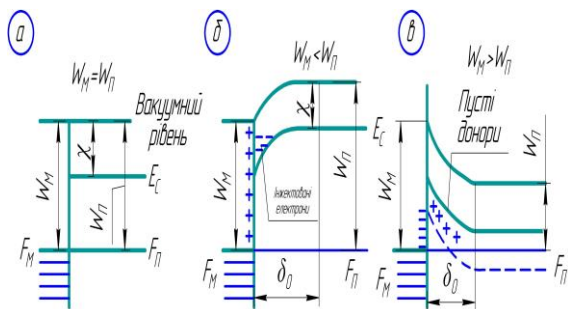


Рис. 3. Схематичне зображення нейтрального (а), омичного (б) та блокувального (в) контактів пар тертя;  $E_C$ ,  $E_F$  – енергетичні рівні накладки

Розглянемо випадки виникнення нейтральних контактів на мікроставуваннях металополімерних пар тертя згідно з рис. 3, а.

**Перший випадок** належить до поверхневих температур полімерної накладки, які мають величини нижчі за допустиму для її матеріалів. Відповідно до рис. 3, а роботи виходу електронів та іонів із металевого ( $W_M$ ) та неметалевого ( $W_P$ ) фрикційного елементів рівні між собою. Значне збільшення роботи

виходу іонів із поверхневого шару накладки дає спорідненість до електрона ( $\chi$ ). Останнє є здатністю деяких атомів і молекул приєднувати додатковий електрон і перетворюватися на позитивні іони.

Мірою спорідненості до електрона є енергія, що виділяється в цьому випадку. Цілеспрямована переорієнтація електронів на іони дає змогу за рахунок цього ефекту досягти рівності робіт виходу частинок.

**Другий випадок.** У процесі досягнення робочою поверхнею полімерної накладки температури вищої за допустиму для її матеріалів відбувається вигорання з поверхневих і приповерхневих шарах сполучних компонентів, що приводить до утворення рідинних острівців на поверхні накладки. За умови контакту робочої поверхні фрикційного металевго елемента з рідиною спостерігаються явища переходу іонів з металу в рідину (рис. 3, а).

Метал входить у розчин як або позитивних іонів, або комплексних негативних іонів, якщо він взаємодіє з розчином рідини. У цьому разі поверхня металу набуває деякого специфічного потенціалу, що встановлює рівновагу між процесом виділення та осадження іонів. Цей потенціал залежить як від природи металу, так і від концентрації іонів у рідині. За умови деякого значення кислотності ( $pH$ ) метал не посилає в розчин іони, а навпаки, приймає їх із розчину, набуваючи заряду до настання електричної рівноваги. Як відомо, метали розташовуються в електрохімічному ряді щодо позитивного іона водню  $H^+$ . У процесі занурення в рідину двох різних металів кожен із них має певний потенціал щодо рідини. Під час контакту металів виникає електричний струм доти, доки в розчині не вичерпані всі іони металів або всі іони розчину. Електричні струми можуть протікати між різними точками однієї металеві поверхні, якщо вона заряджена й неоднорідна.

Крім хімічного механізму електричних явищ, у контакті металу та рідини можливий і інший механізм – електризація поверхонь металу та рідини за умови руху останньої, оскільки шар рідини, переміщаючись, забирає із собою іонний заряд. Розрахунки показують, що значне накопичення зарядів під час руху рідини відбувається в разі питомого її опору вище ніж  $10^9$  Ом·см. Вважається, що в цьому випадку на поверхні металу, що стикається з рідиною, утворюється електричний подвійний шар. Поверхня металу внаслідок втрат або захоплення іонів набуває деякого

хімічного потенціалу, і по ній розподіляється певний заряд. Протилежний за знаком заряд міститься в рідині. Розподіл зарядів у рідині може характеризуватись потенціалом  $\varphi_e$ , який змінюється з відстанню від поверхні відповідно до електростатичних сил і розподілу Больцмана (рис. 3, а). Аналітичний вираз для розрахунку величини потенціалу  $\varphi_e$  отримуємо розв'язанням рівняння Пуассона в припущенні про існування екрануючого подвійного електричного шару [4].

$$\varphi_E = \frac{4\pi\bar{\sigma}}{\epsilon k} \exp k(d-x). \quad (1)$$

Отже, в умовах електротермомеханічного тертя металополімерних пар тертя енергонавантажених робочої поверхні полімерної накладки відіграє вирішальну роль у формуванні нейтрального контакту в зоні фрикційної взаємодії.

Найбільш часто в металополімерних парах тертя [стосовно двошарових («метал - полімер»)] структур гальмівних пристроїв зустрічається омичний (інжектуєчий) контакт (рис. 3, в). Детально про омичний контакт розглянуто в роботі [9].

Залежність енергетичних параметрів динамічного коефіцієнта тертя  $f$  і поверхневої температури гальма за умови тривалого режиму гальмування наведено на рис. 4.

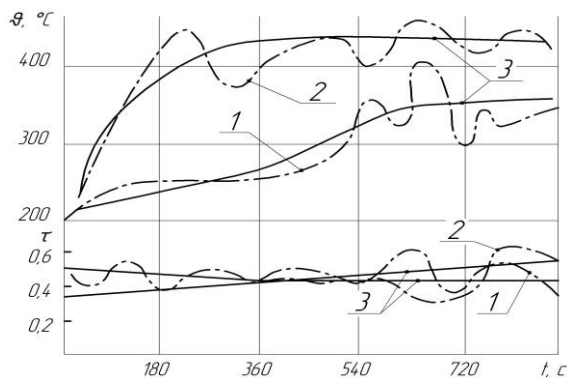


Рис. 4. Залежності енергетичних параметрів  $f = f(t)$  і  $\vartheta = \vartheta(t)$  пар тертя ФК-24А – сталь 35ХНЛ модельного дисково-колодкового гальма під час тривалого гальмування: криві 1 –  $V = 6,25$  м/с;  $P_a = 1,2$  МПа;  $k_{вз} = 0,25$ ; криві 2 –  $V = 12,5$  м/с;  $P_a = 1,5$  МПа;  $k_{вз} = 0,25$ ; криві 3 – усереднених параметрів

Аналіз графічних залежностей (рис. 4) показав таке:

- встановлено, що до допустимої температури робочої поверхні полімерної накладки (330–420 °С) спостерігався пружний стан омичного контакту, а понад 420 °С – пластичний стан нейтрального й блокувального контактів;

- показано, що збільшення швидкості обертання гальмівного диска призводить до суттєвого зростання пластичних деформацій;

- встановлено, що в динамічному коефіцієнті тертя збудником хвильових закономірностей є змінна сила тертя та імпульсна нормальна сила.

### Обговорення результатів

Теоретичні та експериментальні дослідження статичного та динамічного коефіцієнтів тертя у фрикційній взаємодії матеріалів ФК-24А – сталь 35ХНЛ на модельному дисково-колодковому гальмі дали змогу встановити таке:

- у діапазоні реальних імпульсних навантажень, що реалізуються в процесі гальмування в ділянці контакту фрикційної накладки з гальмівним диском, напружено деформований стан контакту за критерієм мікродеформації в контакті відповідає пружно-пластичній властивості;

- пружні та пластичні властивості матеріалів проявляються тоді, коли в кожному окремому випадку сумарні напруження перевищують межу плинності або досягають її межі;

- зі зростанням імпульсної сили нормального притискання накладки колодки до бігової доріжки тертя диска статичний коефіцієнт тертя має тенденцію до збільшення, а зі зростанням статичного коефіцієнта взаємного перекриття  $k_{вз.с}$  – тенденцію до зменшення за умови пружно-пластичної властивості матеріалів;

- у виборі матеріалів пар тертя динамічний коефіцієнт тертя має включати величину статичного коефіцієнта тертя й бути як мінімум на 20 % більшим за розрахункову величину динамічного коефіцієнта тертя;

- збільшення статичного та динамічного коефіцієнта тертя в парах тертя дисково-колодкового гальма призводить до зростання пластичної деформації їхніх мікрорівнів.

### Висновки

Отже, показано вплив статичного та динамічного коефіцієнтів тертя на основні експлуатаційні параметри пар тертя дисково-колодкового гальма.

## Література

1. Иноземцев В. Г. Тормоза железнодородного подвижного состава. Вопросы и ответы. Москва: Транспорт, 1986. 283 с.
2. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава. Москва: Маршрут, 2006. 392 с.
3. Ehlers H. R. Potential and limits of opportunities of the block brake. *Glaser's Annalen*. 2002. № 6/7. P. 290–300.
4. Моисеенко М. А. Анализ нагруженности деталей дискового тормоза скоростного вагона. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=5906> (дата обращения: 21.04.2020).
5. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: справочник. Москва: Машиностроение, 1984. 280 с.
6. Справочник по триботехнике: в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А. Чичинадзе. Т. 1. Теоретические основы. Москва: Машиностроение, 1989. 400 с.
7. Фрикционные материалы на базе углерод-асбестовых волокон для тормозных устройств / В. Н. Старченко и др. *Железные дороги мира*. 2006. № 2. С. 38–42.
8. Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. Москва: Наука, 1967. 231 с.
9. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов и др.; под общ. ред. акад. А. Х. Джанахмедова. Баку: Апострофф, 2016. 312 с.
10. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение, 2003. 576 с.
11. Германчук Ф. К. Долговечность и эффективность тормозных устройств. Москва: Машиностроение, 1973. 173 с.
12. Sergienko V. P., Bukharov S. N. Noise and vibration in friction system. Cham: Springer, 2014. 251 p.
13. Sarkar C., Hirani H. Transient thermo-elastic analysis of disk brake. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2015. Vol. 5. № 1. P. 413–418.
14. 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.
3. Ehlers H. R. Potential and limits of opportunities of the block brake. *Glaser's Annalen*, 2002, no. 6/7, pp. 290–300.
4. Moiseyenko M. A. Analiz nagruzhennosti detaley diskovogo tormoza skorostnogo vagona. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no. 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=5906> (last accessed: 21.04.2020).
5. Kragel'skiy I. V., Mikhin N. M. Uzly treniya mashin: spravochnik. Moskva: Mashinostroyeniye, 1984, 280 p.
6. Spravochnik po tribotekhnike: v 3 t. / pod obshch. red. M. Khebdy, A. Chichinadze. T. 1. Teoreticheskiye osnovy. Moskva: Mashinostroyeniye, 1989, 400 p.
7. Friksionnyye materialy na baze uglerod-asbestovykh volokon dlya tormoznykh ustroystv / V. N. Starchenko et al. *Zheleznyye dorogi mira*. 2006, no. 2, pp. 38–42.
8. Chichinadze A. V. Raschet i issledovaniye vneshnego treniya pri tormozhenii. Moskva: Nauka, 1967, 231 p.
9. Proyektnyy i proverochnyy raschet friksionnykh uzlov lentочно-kolodochnykh tormozov burovyykh lebedok / A. Kh. Dzhanakhmedov i dr.; pod obshch. red. akad. A. Kh. Dzhanakhmedova. Baku: Apostroff, 2016, 312 p.
10. Treniye, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / A. V. Chichinadze i dr.; pod obshch. red. A. V. Chichinadze. Moskva: Mashinostroyeniye, 2003, 576 p.
11. Germanchuk F. K. Dolgovechnost' i effektivnost' tormoznykh ustroystv. Moskva: Mashinostroyeniye, 1973, 173 p.
12. Sergitnko V. P., Bukharov S. N. Noise and vibration in friction system. Cham: Springer, 2014, 251 p.
13. Sarkar C., Hirani H. Transient thermo-elastic analysis of disk brake. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 413–418.
14. Belhocine A. Numerical investigation of a three-dimensional disc-pad model with and without thermal effects. *Thermal science*. 2015, vol. 19, no. 6, pp. 2195–2204.

## References

1. Inozemtsev V. G. Tormoza zheleznodorodnogo podvizhnogo sostava. Voprosy i otvety. Inozemtsev. Moskva: Transport, 1986, 283 p.
2. Asadchenko V. R. Avtomaticheskkiye tormoza podvizhnogo sostava. Moskva: Marshrut, 2006, 392 s.

**Фідровська Наталія Миколаївна:** ORCID 0000-0000-0000-0000 д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Я. Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, тел.: +38 057 700 3864, 097 996 7641, e-mail: [nfidrovskaya@ukr.net](mailto:nfidrovskaya@ukr.net),

**Іваненко Олег Іванович,** канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, тел.: +38050-905-74-90, e-mail: [olehiv2@gmail.com](mailto:olehiv2@gmail.com),

**Баженов Владислав Олександрович,** бакалавр кафедри будівельних і дорожніх машин,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, тел.: +380660243019, e-mail: bazhenov1609@gmail.com,

**Нікіпчук Сергій В'ячеславович:** ORCID 0000-0003-2499-9990, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000, тел.: +38 0322 582 111, 099-318-89-12; e-mail: nikipch@gmail.com,

**Присяжний Андрій Володимирович** – майор, викладач кафедри військової підготовки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, e-mail: pav041284@ukr.net.

### Static and dynamic coefficient of friction in friction pairs of disc-pad brakes

**Abstract. Problem** This scientific article is devoted to the value of static and dynamic coefficients of friction of disc-pad brakes. The issue of disc-pad brake wear is very acute because the safety of using the machine itself depends on its reliable operation. Therefore, the relevance of the chosen topic cannot be doubted.

**Goal.** The aim is to establish patterns of influence of the main operational parameters of friction pairs of a model disc-pad brake on the potential and kinematic coefficient of friction. **Methodology.** The methods of analytical mechanics and the theory of elasticity were used in the article. **Results.** Theoretical and experimental studies of the static (former rest) and dynamic coefficients of friction in the frictional interaction of materials FK-24A – steel 35KhNL were carried out on a model disk-shoe brake in a long-term braking mode. At the same time, it was established in the range of real impulse loads implemented during braking in the contact area of the friction lining with the brake disc, the stress-strain state of the contact according to the criterion of micro deformation in the contact corresponds to the elastic-plastic property. The elastic and plastic properties of materials appear when, in each individual case, the total stresses exceed the yield

strength or reach its limit. With an increase in the impulse force of the normal pressing of the pad lining to the treadmill of the disc friction, the static coefficient of friction tends to increase, and with an increase in the static coefficient of mutual overlap  $k_{vz,s}$ , it tends to decrease with the elastic-plastic property of materials. When choosing materials for friction pairs, the dynamic coefficient of friction must include the value of the static coefficient of friction and be at least 20% greater than the calculated value of the dynamic coefficient of friction. **Practical value** An increase in the static and dynamic friction coefficient in the friction pairs of a disk-pad brake leads to an increase in the plastic deformation of their microprotrusions. The data obtained can be used in the design of disc-shoe brakes.

**Key words:** disk-shoe brake, friction pairs, elastic and plastic deformations, static and dynamic coefficients of friction.

**Fidrovskaya Nataliya**, doctor. technical Sciences, professor, head of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, str. 25 Ya. Mudrogo, tel.: 097 996 7641, e-mail: nfidrovskaya@ukr.net,

**Nikipchuk Serhii**, ORCID 0000-0003-2499-9990 candidate. technical Sciences, Associate Professor of the Department of Motor Transport, Lviv Polytechnic National University, st. 12 Stepana Bandera str., Lviv, Ukraine, 79000, tel.: +38 0322 582 111, 099-318-89-12; e-mail: [nikipch@gmail.com](mailto:nikipch@gmail.com),

**Ivanenko Oleh**, PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, tel.: +38050-905-74-90, e-mail: [olehiv2@gmail.com](mailto:olehiv2@gmail.com),

**Bazhenov Vladislav**, bachelor of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, tel.: +380660243019,

e-mail: [bazhenov1609@gmail.com](mailto:bazhenov1609@gmail.com),

**Prysjajniy Andriy** – major, lecturer of department of military service of Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Karatska str. 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, E-mail: [pav041284@ukr.net](mailto:pav041284@ukr.net)