

УДК 521.597

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16473

Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ<sup>1</sup>, А. В. ПРИСЯЖНИЙ<sup>1</sup>, Е. Ю. АНДРЕЙЧИКОВ<sup>1</sup>,  
М. В. САВЧИН<sup>2</sup>, В. Я. МАЛИК<sup>2</sup>

## ВПЛИВ РІЗНИХ СХЕМ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕПЛОВОЇ ДІЇ НА СТАН ФРИКЦІЙНИХ НАКЛАДОК ДИСКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

<sup>2</sup>Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу, Україна

*До матеріалів статті увійшли такі питання: теплові струми при одно- та двосторонньому терті у дисково-колодкових гальмах; енергонавантаженість дисково-колодкових гальм та їх основні експлуатаційні параметри; обговорення результатів Встановлено, що поверхнево-об'ємні температури пар тертя «диск-накладка» забезпечують розподіл теплоти при одному та двосторонньому його підведенні при високотемпературних градієнтах і при цьому різниця в енергонавантаженості становить до 20%. Показано, що величина збільшення товщини накладки колодки при односторонньому тепловому впливі залежить від кількості та інтенсивності виділення газоподібних продуктів піролізу зв'язуючого, не перевищувало 0,8% і є значно менше рекомендованих значень (не більше 2,5%). Електроtermомеханічне тертя як сукупність фізичних процесів, явищ і ефектів у зоні контакту пар тертя трибологічної системи є дисипативним процесом, якому притаманне: виділення теплоти, електризація тіл, що труться, трибохімічні реакції, структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах деталей, що труться. Теплові процеси при терті є основним каналом дисипації (розсіювання) енергії і багато в чому визначають характер перебігу сукупності фізико-хімічних процесів, що породжуються тертям у трибосистемах і суттєво впливають на динамічний коефіцієнт тертя, зміну якого розглянуто в механічному, електричному, тепловому та хімічному полях. Доцільно матеріали пар тертя підбирати за силою тертя, питомими навантаженнями і контактним зміщенням їх мікровиступів, а також енергонавантаженості, які залежать від фізико-механічних і хімічних процесів, що протікають у контактній зоні. Проведено оцінку імпульсного теплового впливу на фрикційні накладки та його вплив на експлуатаційні параметри дисково-колодкового гальма.*

**Ключові слова:** дисково-колодове гальмо, пари тертя, одно та двостороннє імпульсне підведення теплоти, динамічний коефіцієнт тертя, лінійне зношування.

**Вступ.** Зростання експлуатаційної термонавантаженості гальмівних механізмів зумовлено суттєвим підвищенням швидкісних характеристик транспортних засобів. Посилення нормативних вимог до ефективності гальмування змушують їх виробників конструктивно удосконалювати фрикційні вузли, вводити системи стеження, контролю та регулювання процесу гальмування, а розробників фрикційних матеріалів удосконалювати експлуатаційні властивості накладок. Значна роль відводиться факторам комфортабельності та екології.

У зв'язку з цим принципово нові вимоги висувуються до пар тертя дискових гальмівних пристроїв, основними особливостями яких є високий рівень поверхнево-об'ємних температур, зменшення площі тертя накладок, високий рівень швидкостей і питомих навантажень, зниження жорсткості елементів конструкцій. Усе це призвело до того, що значно погіршилися умови роботи накладок і виникли нові труднощі розробки фрикційного матеріалу для пари тертя, такі як недостатня термомеханічна міцність, інтенсивний знос контртіла та інших [1-5].

До найбільш важливих проблем відносяться: підвищення динамічного коефіцієнта тертя в парі «метал - полімер» у дисково-колодковому гальмі; зменшення впливу несприятливих атмосферних умов на роботу гальм; створення фрикційних накладок з високим стабільним динамічним коефіцієнтом тертя та великою зносостійкістю; розробка надійної та довговічної конструкції гальмівних дисків, що забезпечують ефективне розсіювання енергії.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Електротермомеханічне тертя як сукупність фізичних процесів, явищ і ефектів у зоні контакту пар тертя трибологічної системи є диссипативним процесом, якому притаманне: виділення теплоти, електризація тіл, що труться, трибохімічні реакції, структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах деталей, що труться.

Дисково-колодкові гальма транспортних засобів мають мінімальний коефіцієнт взаємного перекриття  $K_{B3}$  і тому понад 80% бічних поверхонь гальмівного диска не знаходяться у фрикційній взаємодії з фрикційними накладками колодок [6]. Зазначені поверхні гальмівного диска примусово охолоджуються зустрічними потоками повітря під час руху транспортного засобу. Особливістю нагрівання бігової доріжки тертя гальмівного диска є те, що над її верхнім радіусом знаходиться менше металоемності диска, ніж під нижнім радіусом (тіло диска та фланця). Нагрівання бігової доріжки тертя залежить з якою швидкістю обертається диск і яке нормальне зусилля прикладено з боку накладок колодок до його робочої поверхні, а також ціле чи неціле число разів вписується робоча поверхня накладки в бігову доріжку тертя гальмівного диска [7]. Ця обставина дозволяє робочим поверхням накладок колодок рухатися по новому сліду бігової доріжки тертя диска. Кожна наступна від попередньої фрикційної взаємодії пари «диск - накладка» відрізнятиметься на величину  $\Delta t$ , яка змінюється за лінійним або експонентним законом. Слід розрізнити три стадії фрикційної взаємодії пари «диск - накладка»: на першій – диск не прогрітий і тому спостерігається нерівність середніх температур його бігової доріжки тертя ( $t_d$ ) та робочої поверхні накладки ( $t_n$ ), тобто  $t_n > t_d$  та теплота від накладки поширюється на тіло диска; на другій – коли бігова доріжка тертя диска прогріта спостерігається встановлений тепловий стан (кількість теплоти підведена до полірованої поверхні бігової доріжки тертя дорівнює кількості теплоти, яка відводиться в повітря, що омиває складним теплообміном від матових поверхонь диска з фланцем) [8] тим часом  $t_n = t_d$ ; на третій - коли температура робочої поверхні накладки досягла допустимої для її матеріалів (відбувається вигорання зв'язуючих компонентів матеріалів з утворенням фази «рідина – пар») і тоді  $t_n < t_d$ , але при цьому відбувається деяке зниження середньої поверхневої температури бігової доріжки тертя за рахунок її охолодження [9].

У роботі [10] наведено аналіз існуючих методів оцінки інтенсивності зношування фрикційної пари «гальмівний диск (барабан) – колодка», що дозволяють прогнозувати її ресурс. Проте оцінку ресурсу фрикційних накладок колодок було виконано без урахування енергетичної складової. Оцінку ресурсу фрикційних накладок колодок дискового гальма було здійснено з урахуванням механічного, електричного та теплового полів [11]. При цьому не було враховано хімічне поле, що весь час присутнє при експлуатації пар тертя гальма. Вибір матеріалів пар тертя [12] був проведений з урахуванням зміщення їх мікровиступів, але при цьому не розглядалося зміна коефіцієнта взаємного перекриття пар тертя.

**Постановка завдання дослідження.** До матеріалів статті увійшли такі питання: теплові струми при одно- та двосторонньому терті у дисково-колодкових

гальмах; енергонавантаженисть дисково-колодкових гальм та їх основні експлуатаційні параметри; обговорення результатів.

**Метою цієї роботи** стало встановлення впливу імпульсного теплового впливу на стан накладок і оцінка основних експлуатаційних параметрів пар тертя дисково-колодкового гальма.

**Теплові струми при одно- та двосторонньому терті в дисково-колодкових гальмах.** В одній із своїх численних робіт А. В. Чичинадзе методом накладання була отримана залежність для визначення середньої температури поверхні при двосторонньому терті гальмівного диска в кінці процесу гальмування, що має вигляд

$$t'_2 = t'_1 + t'_\xi = \frac{W_T(1 - \alpha_{m.n.})\delta_1}{\lambda_1 A_{a1} \tau_T} \left\{ \left[ \frac{2}{3} - \xi(1 - \xi/2) \right] \tau_N + 2F_{O_1} \tau_W \right\}, \quad (1)$$

де  $t'_1$  – середня температура поверхні тертя диска при односторонньому підведенні теплоти в момент часу  $t' = \tau_k / \tau_T$  (де  $\tau_k$  – поточна координата часу)

$$t'_1 = \frac{W_T(1 - \alpha_{m.n.})\delta_1}{\lambda_1 A_{a1} \tau_T} \left[ \frac{1}{3} \tau_N + 2F_{O_1} \tau_W \right], \quad (2)$$

де  $W_T$  – повна робота гальмування;  $\alpha_{m.n.}$  – коефіцієнт розподілу теплових потоків;

$$\alpha_{m.n.} = \left[ 1 + \frac{\delta_1 \lambda_2}{\delta_2 \lambda_1} \left( \frac{1/3 \tau_N + F_{O_2} \tau_W}{1/3 \tau_N + F_{O_1} \tau_W} \right)^{-1} \right], \quad (3)$$

$\delta_{1,2}$  – товщина фрикційних елементів;  $A_{a1,2}$  – номінальна площа тертя;  $\tau_T$  – тривалість гальмування;  $\lambda_{1,2}$  – коефіцієнти теплопровідності;  $\tau_N$  і  $\tau_W$  – часові характеристики потужності та роботи;  $F_{O_{1,2}}$  – критерій Фур'є фрикційних елементів;

$$F_{O_{1,2}} = a_{1,2} \tau_T / \delta_{1,2}^2, \quad (4)$$

$a_{1,2}$  – коефіцієнт температуропровідності.

Співвідношення номінальної  $\delta_{ном}$  та ефективної глибини проникнення теплоти  $\delta_{ef}$ , що визначається як

$$\delta_{ef} = 1,73 \sqrt{a \tau}, \quad (5)$$

мають визначальний вплив на взаємодію теплових потоків, і, отже, на поверхневу температуру при двосторонньому терті.

Якщо ефективна глибина проникнення теплоти менше половини товщини фрикційного елемента, тобто  $\xi = \delta_{ном} / \delta_{ef} \geq 2,0$ , то теплові потоки від протилежних сторін диска не впливатимуть на середню температуру поверхні тертя, і вона визначатиметься відповідно до залежності (2).

Якщо ефективна глибина проникнення теплоти більше половини товщини диска ( $\xi < 2,0$ ), вплив теплового потоку від протилежної сторони диска може бути враховано в такий спосіб.

Приймаючи, що  $\xi = \delta_{ном} / \delta_{ef}$ , отримуємо вираз вигляду

$$t'_\xi = \frac{W_T(1 - \alpha_{m.n.})\delta_1}{\lambda_1 A_{a1} \tau_T} \left[ \frac{1}{3} \tau_N - \xi(1 - \xi/2) \tau_N + 2F_{O_1} \tau_N \right]. \quad (6)$$

Припустимо, що фрикційні елементи в гальмі навантажені рівномірно, тобто теплові потоки, що генеруються на протилежних сторонах дисків, рівні.

Як випливає з рівняння (1), середня температура поверхні гальмівного диска при двосторонньому терті в кінці гальмування в порівнянні з одностороннім збільшується вдвічі, про що свідчать графічні залежності, наведені на рис. 1 а, б, в для чотиридискового гальма КТ81-3, диски якого виготовлені з серійних фрикційних матеріалів - металокераміки ФМК - 11 і чавуну ЧНМХ [13].

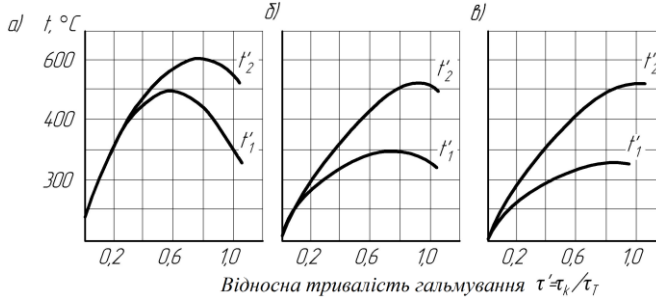


Рис. 1. Закономірності зміни середньої температури поверхні при односторонньому ( $t'_1$ ) і двосторонньому ( $t'_2$ ) терті в процесі гальмування при: а –  $\zeta = 1,0$ ; б –  $\zeta = 0,6$ ; в –  $\zeta < 0,4$

Аналіз наведених залежностей на рис. 1 а, б, в дозволяє констатувати наступне:

- найбільші температури поверхні тертя спостерігаються при значенні  $\zeta = 1,0$ , тобто при  $\delta_{ном} = \delta_{ef}$ ;
- при зменшенні значення параметра  $\zeta$  необхідний більший проміжок відносного часу гальмування для досягнення максимальних поверхневих температур;
- максимальні температури при односторонньому терті досягаються швидше, ніж при двосторонньому у всьому діапазоні зміни параметра  $\zeta$ , оскільки в другому випадку зустрічні теплові потоки блокуються і при цьому гасяться, або ж розповсюджуються вгору та вниз радіусом диска.

На рис. 2 проілюстровані термодинамічні параметри пар тертя дисково-колодкового гальма з яких випливає, що поверхнево-об'ємна температура стабілізується в інтервалі часу від 0,35 до 0,65 с. Градієнти температури падають через прогрівання бігової доріжки тертя диска. Що стосується коефіцієнта розподілу теплових потоків у спряженні, то в інтервалі часу від 0,2 до 0,6 с вони квазістабілізуються. При цьому товщина накладок, як у нагрітому, так і примусово охолодженому станах не перевищувала рекомендоване значення не більше 2,5%.-

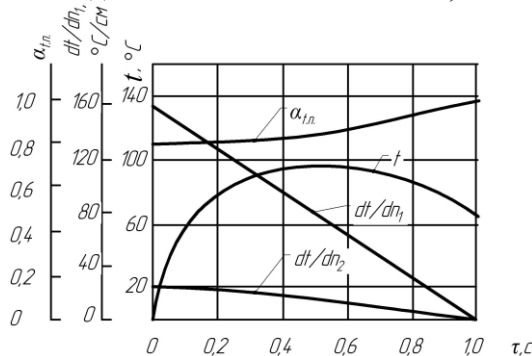


Рис. 2. Імпульсне підведення теплоти до пар тертя переднього дисково-колодкового гальма автомобіля ВАЗ 2108-99 при циклічних гальмуваннях:  $\alpha_{т.п.}$  - коефіцієнт розподілу теплових потоків;  $t$  – поверхнево-об'ємна температура тертя;  $dt/dn_1$ ,  $dt/dn_2$  – температурний градієнт металевого та фрикційного елемента;  $\tau$  – час гальмування

**Енергонавантаженість дисково-колодкових гальм та їх основні експлуатаційні параметри.** Вплив енергонавантаженості фрикційних вузлів дисково-

колодкового гальма на зносо-фрикційні властивості їх фрикційних накладок; 99 передніх дисково-колодкових гальм, що випробовують різні режими навантаження (табл. 1).

Таблиця 1

**Результати тестів фрикційних накладок колодок легкових автомобілів сімейства ВАЗ 2108 – 2110; 99 передніх дисково-колодкових гальм при різних режимах навантаження**

№ п/п	Марка матеріалу накладки	Коливання			Линійне зношення, мм		Міцність з'єднання накладки з колодкою, МПа
		$p^*$ , МПа	$f^*$	$t_n^*$ , °C	диска	накладки	
1	РОСТДОТ 5000EURO	2,0-8,0	0,36-0,546	50,0-540,0	0,04/-	1,07/0,85	9,5/2,5
2	591 700В (Німеччина)	2,0-6,0	0,26-0,5	50,0-500,0	0,023/-	0,79/0,85	3,45/3,5
3	MS 13.0460-2965.2 (Німеччина)	2,0-6,0	0,21-0,51	50,0-500,0	0,05/-	0,72/0,85	13,2/3,5
4	311FF КВА 60 793.00 (фірма Continental Teves)	2,0-6,0	0,41-0,58	50,0-530,0	0,02/-	0,71/0,85	8,4/2,8
5	RX 2040 (фірма Continental Teves)	2,0-6,0	0,39-0,66	50,0-530,0	0,012/-	0,7/0,85	9,6/2,8
6	LMS 11690R – 01107/364 GDB (469.8.80.91 безазбестові)	2,0-6,0	0,46-0,51	50,0-400,0	0,025/-	0,81/0,85	10,0/2,8
7	АОВ 0173 (фірма Allied Nippon)	2,0-6,0	0,64-0,37	50,0-450,0	0,011/-	0,52/0,85	8,4/2,8
8	V210, безазбестові (Fin Wahle, Німеччина)	2,0-6,0	0,58-0,33	50,0-450,0	0,02/-	1,02/0,85	9,8/2,8
9	FDB 527 (фірма Federal Mogul)	2,0-6,0	0,47-0,39	50,0-450,0	0,024/-	0,63/0,85	6,2/2,8
10	FD-P -2003 (фірма Pilenga)	2,0-6,0	0,535-0,275	50,0-450,0	0,005/-	1,22/0,85	10,8/2,8

\*Примітка: у чисельнику – поточні значення величин параметрів, а знаменнику їх допустимі величини

Аналіз даних експлуатаційних параметрів для дисково-колодкових гальм [7] показав наступне:

– лише перший фрикційний матеріал працював при питомих навантаженнях від 2,0 до 8,0 МПа, проте інші матеріали працювали при питомих навантаженнях від 2,0 до 6,0 МПа;

– мінімальне значення динамічного коефіцієнта тертя мали третій (0,21), другий (0,26) та десятий (0,275) фрикційні матеріали; у той самий час у інших

фрикційних матеріалах мінімальні значення динамічного коефіцієнта тертя коливалися від 0,33 до 0,46; при цьому максимальні значення динамічного коефіцієнта тертя змінювалися від 0,47 до 0,66;

– мінімальна поверхнева температура для всіх пар тертя становила 50 °С, а максимальна - (530 - 540) °С, яка набагато перевищувала допустиму температуру (390 °С) для матеріалів фрикційної накладки; тільки для шостого матеріалу накладки максимальна поверхнева температура становить 400°С;

– мінімальне лінійне зношування бігової доріжки тертя диска мали десята, сьома і п'ята пари тертя, що змінюється від 0,005 до 0,012 мм; що стосується лінійного зношування робочих поверхонь фрикційних накладок, то їх мінімальне зношування мало місце в дев'ятій (0,63 мм), п'ятій (0,7 мм) і четвертій (0,71 мм) парах тертя, а максимальне зношування – у восьмій (1,02 мм), першій (1,07) та десятій (1,22 мм) парах тертя; при цьому регламентоване зношування робочої поверхні накладки (0,85 мм) було перевищене у першій (1,07 мм), восьмій (1,02 мм) та десятій (1,22 мм) парах тертя, що пов'язано з великими величинами питомих навантажень, динамічних коефіцієнтів тертя і, як наслідок, поверхневих температур пар тертя;

– міцність з'єднання неробочої поверхні фрикційної накладки з основою колодок тільки в одному випадку не відповідало допустимій величині (3,5 МПа) для другої пари тертя становило 3,45 МПа; для всіх інших пар тертя поточні значення величин міцності з'єднання були більшими (2,20 – 3,85) рази.

Таким чином, через невеликі коефіцієнти взаємного перекриття пар тертя (0,1 – 0,2) у дисково-колодкових гальмах автотранспортних засобів спостерігається збільшення питомих навантажень у 8 – 10 разів, динамічного коефіцієнта тертя у 1,5 – 1,7 раза, поверхневих температур у 1,3 – 1,7 рази, і, як наслідок, зношування пар тертя у 3,5 – 4,5 рази більшого, ніж у парах тертя барабанно-колодкових гальм автотранспортних засобів.

Для розуміння роботи полімерного матеріалу в зоні допустимої температури вищої розглянемо деривотограму зразка ФК-24А (див. рис. 3), отриману академіком А. Х. Джанахмедовим та І. М. Богатчуком (табл. 2).

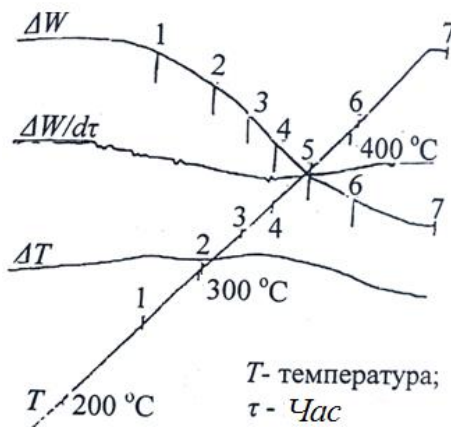


Рис. 3. Деривотограма зразка ФК-24А:  $\Delta W$  – втрати маси, що визначаються за термогравіметричною кривою;  $dW/d\tau$  – швидкість зміни (диференціально-термогравіметрична крива);  $\Delta T$  – диференціально-термічна крива

**Відсоткове співвідношення компонентів газової суміші, утвореної  
у міжконтактному просторі при терті фрикційної пари  
(дані І. М. Богатчука)**

Номер проби	Фрикційний матеріал	Температура, °С	Вміст газу, мас. частка, %						
			H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	ΣC <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	інші гази***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	Решта
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	

**Примітка:**

\* Наявність слідів зазначених газів

\*\* Відбір проб здійснювався з чотирьох зон (крапок) одночасно.

\*\*\* Під іншими газами мається на увазі: Ar, Ne, He, Kr, N<sub>2</sub>O, Xe, O<sub>2</sub>, Rn

Фрикційні матеріали для гальмівних пристроїв повинні досліджуватися з позицій фізико-механічної теорії тертя в режимі гальмування із застосуванням термогравіметричного та диференціально-термічного методів аналізу.

Результати зазначених досліджень для зразка із матеріалу ФК-24А представлено на рис. 3. Встановлено, що термодеструкція зразка ФК-24А починається за температури 300°С. Розрахована енергія активації розкладання зразка ФК-24А становила 85,5 кДж/моль. Доведено, що зразок розпадається протягом 15 хвилин за підтримки його температури 400°С. Швидкість зменшення його маси за подальшого збільшення температури зростає. Необхідно відзначити, що режими дослідження матеріалу ФК-24А на термостійкість у вигляді зразка не завжди повною мірою відповідають реальним умовам роботи поверхневих шарів фрикційних накладок у парах тертя гальмівних пристроїв.

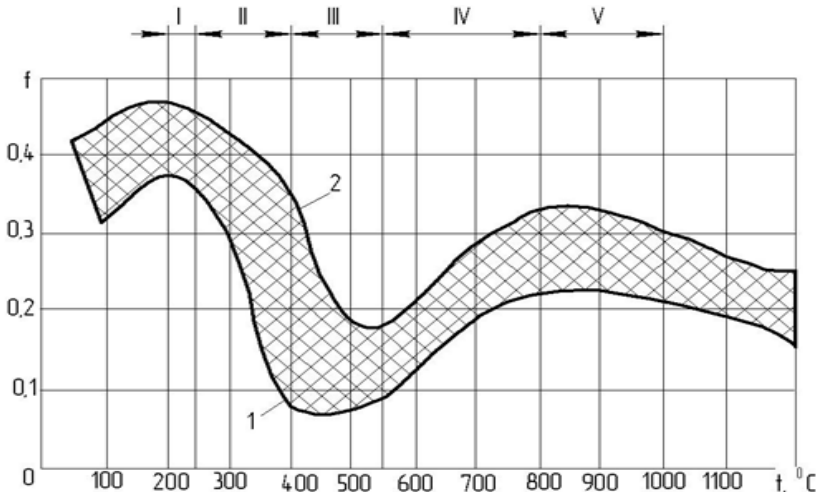


Рис. 4. Еталонна зміна коефіцієнта тертя матеріалу «Ретинакс» ФК-24А функції температури поверхні тертя по зонах: I – 200...250°С; II – 250...400°С; III – 400...550°С; IV – 550...800°С; V – 800...1000°С

Аналіз графічної залежності (рис. 4) наведено у табл. 3.

Таблиця 3

## Енерговантаженість дискретного контакту мікровиступів металополімерних пар тертя трибосистеми

1	2	3	4	5	6		7
					електричних шарів	теплових шарів	
Стан поверхневого і підповерхневого шару накладки		Стан міжконтактного середовища		Опис характеристик фрикційної взаємодії:		Циркуляція струмів	
		Нааявність подвійних електричних шарів		електричних шарів		теплових шарів	
		Опис характерних фрикційної взаємодії:		електричних шарів		теплових шарів	
1	2	3	4	5	6	7	
Поверхнева температура	Нижче допустимої для матеріалу фрикційної накладки	При електротермомеханічному терті мікровиступів металополімерних пар тертя під дією імпульсних нормальних зусиль на поверхнях плям контактів різних типів генеруються імпульсні електричні струми, які прошивають найтонші окисні плівки, сприяючи їх руйнуванню. Під дією все зростаючих імпульсних питомих навантажень відбувається активна деформація мікровиступів, тобто поверхневих шарів полімерних накладок і зміцнення плям контактів металевого елемента тертя. На цій стадії відбувається підготовка поверхневих шарів до утворення достатньої кількості активних центрів, що визначають їх подальший розвиток внаслідок повзучості металу. При цьому має місце інжектований контакт. При підвищенні температури контактуючих мікровиступів металополімерних пар тертя трибоспрямжень від 100 до 200 °С спостерігається коливання динамічного коефіцієнта тертя (від 0,39 до 0,42) (рис. 3). При цьому електричні поля в трибоспрямленнях слабшають, а теплові поля посилюються. Характеристика фрикційної теплостійкості на цій ділянці визначається, в основному, пружно-пластичними властивостями матеріалу (перехід від пружного до пластичного контакту). На ділянці від 200 до 350 °С коефіцієнт тертя залежить від рівня пластичних деформацій з поступовим, в міру підвищення температури, димленням сполучних компонентів полімерних матеріалів. Мікроконтакти за енергетичними характеристиками наближаються до нейтральних.	Виникає подвійний електричний шар на робочій поверхні металевого елемента тертя. При цьому контактів плями контактів мікровиступів використовують функції мікротермоелектрогенератора, а поверхневі та приповерхневі шари полімерних накладок – мікротермоелектрохолодильників. Бічні поверхні мікровиступів є накопичувачами зарядів, тобто мікротермоелектроконденсаторами. На плямах контактів інтенсифікуються поляризаційні процеси.	Струм електризації поширюється від плям контактів мікровиступів полімерної накладки до плям контактів а мікровиступів металевого елемента тертя.	Генерована електрична енергія перетворюється в теплову енергію. Тіло металевого елемента тертя і приповерхневі шари полімерних накладок нагріваються.	Мікровиступи пар тертя омиваються потоком витриманого навколишнього середовища	



Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
Поверхня температура	При досягненні допустимі матеріалами	Електротермомеханічне тертя відбувається при імпульсних питомих навантаженнях на плямах контактів мікровиступів трибосприяжень. При цьому проявляються закони нествановленої повзучості в умовах постійної зміни (завичай зменшення) термонапружень у поверхневому шарі металевого елемента тертя (див. рис. 4, стадія ІІІ). На ділянці від 450 до 600 °С підвищення коефіцієнта тертя пояснюється утворенням кокоподібних продуктів деструкції сполучних компонентів, що зумовлює формування робочого шару. Він сприяє виникненню блокуючих контактів мікровиступів трибосприяжень. При температурах 600-800 °С і вище динамічний коефіцієнт тертя стабілізується і досягає значення 0,32 (див. рис. 3). Інтенсифікуються деполіаризаційні процеси на плямах контактів мікровиступів трибосприяжень. Азот і вуглекислий газ (табл. 2) є нейтральними середовищами, в яких адсорбційний і шліпний ефекти вироджуються. При цьому спостерігається збільшення концентрації Н <sub>2</sub> до 0,171% у масових частках і поява СО до 0,43% у масових частках.	Виникає й розвивається сильний подвійний електричний шар у приповерхневих шарах полімерних накладок і слабкий подвійний електричний шар на металевих мікровиступах металевого елемента тертя через їх нагрівання. Приповерхневий шар накладок виконує функції мікрогенератора, а мікровиступи металевого елемента тертя – зародженням мікроелектрохолодильника.	Переважає інверсія електричних струмів від плям контакту мікровиступів металевого елемента тертя в приповерхневі шари полімерних накладок. Слабка інверсія в напрямку струмів зумовлена зародженням зворотних струмів.	На поверхні полімерної накладок виникають острови рідини, яка є електролітом. При цьому починається формування сильного подвійного електричного шару на робочій поверхні накладок.	Мікровиступи партертя омиваються рідинною поверхнею, що витісняє поверхневі шари полімерних накладок.
Поверхня температура	При перевитненні допустимі матеріалом	Електротермомеханічне тертя відбувається внаслідок повзучості поверхневих шарів у парі тертя «полімер-метал». При цьому з ростом температури процес розвитку фізичного контакту інтенсифікується і може переходити на інші енергетичні рівні, змінюючи тим самим тип контактів. Фізичний контакт омичного типу зумовлює релаксацію внутрішніх термонапружень у поверхневому шарі елемента тертя за рахунок поверхневого пластичного тертя (див. рис. 3, стадія ІІ). Коефіцієнт тертя стабілізується і має мінімальне значення (0,18) (див. рис. 3). Ця зона є областю депресії через деполіаризаційні процеси, в ній фрикційні характеристики цілком визначаються змашувальною дією рідких продуктів деструкції сполучних компонентів. Спостерігається різке зменшення концентрації СО <sub>2</sub> до 0,13% (у масових частках) і з'являється Н <sub>2</sub> до 0,13% (у масових частках) [див. табл. 2].	Існує сильний подвійний електричний шар, сформований приповерхневому шарі полімерних накладок. Подвійний електричний шар біля робочої поверхні металевого елемента тертя є ослабленим. При цьому виконує функції термоелектро-генератора, а приповерхневі шари накладок термоелектрохолодильників.	Переважає інверсія електричних струмів від робочих поверхонь полімерних накладок в роботу поверхню металевого елемента тертя (зворотний струм). У той же час спостерігаються слабкі прямі струми.	Циркулюючи теплові струми в металевому елементі тертя сприяють термостабілізації його стану його ободу.	Мікрорис-тупи трибосприяження омиваються річовинами, що витісняє поверхневі шари полімерних накладок.

Деструкція фрикційних матеріалів супроводжується інтенсивним димленням, а потім утворенням рідких фракцій у порах поверхневого шару. При цьому молекули адсорбенту міцно утримуються в мікропорах поверхневого шару матеріалу внаслідок того, що вони оточені великою кількістю атомів вуглецю. Адсорбція газової фази - це процес конденсації, який відбувається в умовах, коли енергія адсорбції виявляється достатньою для конденсації пари. Сконденсована пара залишається в пористій структурі вуглецю у вигляді рідини. Виходячи з вищевикладеного, необхідно ще для металополімерних пар тертя провести оцінку процесів трибокскрінгу (табл. 2) при їх фрикційній взаємодії, після чого переходити до остаточного вибору пари тертя.

Покращити знософрикційні властивості матеріалу накладок можна за рахунок застосування в них вуглецевих нанотрубок.

Густина нанотрубок у п'ять разів менша, ніж у сталі, а міцність у десятки разів більша. Тому, щоб зробити полімерні матеріали більш міцними, не збільшуючи їх ваги, хіміки вирішили включати до складу вуглецеві нанотрубки. Якщо між сусідніми волокнами полімерного матеріалу помістити нанотрубку, зв'язавши її з ними вуглеводневими ланцюжками, то міцність даної ділянки матеріалу наблизиться до міцності нанотрубки (див. рис. 5). Таким чином, добавка нанотрубок 0,6% дає 4-х кратне збільшення міцності матеріалу. Вчені вважають, що якщо нанотрубки займатимуть 10% об'єму полімеру, то зможуть збільшити його міцність у 20 разів.

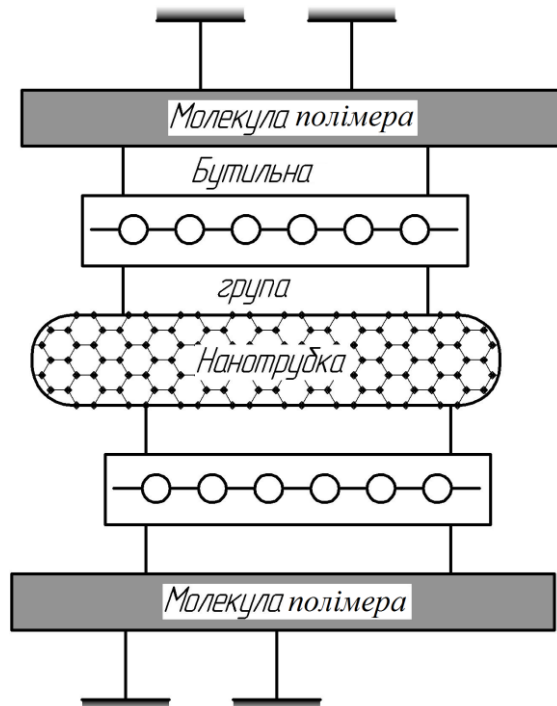


Рис. 5. Схематичне зображення нанотрубки, вбудованої між молекулами полімеру, з'єднаної з ними за допомогою бутильних груп. Взято з New Scientist, 18 September 2004, p. 18

Таким чином, проведена оцінка енергонавантаженості пар тертя дисково-колодкових гальм та їх основних експлуатаційних параметрів.

**Обговорення результатів.** Теоретичні та експериментальні дослідження теплового впливу на стан фрикційних накладок дисково-колодкових гальм

дозволили встановити таке:

– отримані поверхнево-об'ємні температури пар тертя «диск - накладка» показують розподіл теплоти при одно- та двосторонньому його підведенні при високотемпературних градієнтах і при цьому відмінність в енергонавантаженості становить до 20%;

– величина збільшення товщини накладки колодки при односторонньому тепловому впливі залежить від кількості та інтенсивності виділення газоподібних продуктів піролізу зв'язуючого (отже, і тиску газів у наближених до поверхні порах матеріалу), а також від наявності та кількості пор у матеріалі, що сприяють зниженню тиску в порах та зменшення можливості виникнення мікроривів;

– збільшення товщини випробуваних накладок як у нагрітому, так і в охолодженому стані не перевищувала 0,8% (а для деяких матеріалів має негативні значення), що значно менше рекомендованих значень (не більше 2,5%);

– теплові процеси при терті є основним каналом дисипації (розсіювання) енергії та багато в чому визначають характер перебігу сукупності фізико-хімічних процесів, що породжуються тертям у трибосистемах. Також вони істотно впливають на динамічний коефіцієнт тертя, зміну якого розглянуто в механічному, електричному, тепловому та хімічному полях;

– доцільно матеріали пар тертя підбирати за силою тертя, питомими навантаженнями та контактним зміщенням їх мікрориступів, а також енергонавантаженості, які залежать від фізико-механічних та хімічних процесів, що протікають у контактній зоні.

**Висновки.** Таким чином, проведено оцінку імпульсного теплового впливу на фрикційні накладки та його вплив на експлуатаційні параметри дисково-колодкового гальма.

#### Література

1. Фрикционное взаимодействие в электрических и тепловых полях металлополимерных пар трения / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2014. - №6 (2). – С. 30 – 54.
2. Фрикционные узлы / [А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, П. Ю. Пургал, Д. А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах Том. 1. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
3. Фрикционные узлы / [А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, П. Ю. Пургал, Д. А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах Том. 2. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
4. Чичинадзе А. В. Материалы в тробтехнике нестационарных процессов / А. В. Чичинадзе, Р. М. Матвеевский, Э. Д. Браун – М.: Наука, 1986. – 248 с.
5. Чичинадзе А. В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / А. В. Чичинадзе, В. Я. Белоусов, И. М. Богатчук – Львов: Вища школа, 1989. – 144 с.
6. Дисковые и дисково-колодочные тормоза в машиностроении / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев [и др.] / Том. 2. Баку: Апострофф-А, 2021. – 392 с.
7. Дисковые и дисково-колодочные тормоза в машиностроении / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, М. Я. Джавадов [и др.] / Том. 1. Баку: Апострофф-А, 2020. – 376 с.
8. Гудз Г. С., Глобчак Н. В., Коляса А. Л., Яворский Я. П. Тепловой расчет автомобильных дисковых тормозов на типичных режимах испытаний. – Львов: Лига – пресс, 2007. – 126 с. На укр. яз.
9. Perspectives of application of Russian carbon friction composite materials in brakes of aviation wheels. ASME, Intern. Congress, Atlanta, USA, November / [Chichinadze A. V., Bakin A. I., Mozalev V. V., Suvorov A. V.]. – Atlanta, USA, 1996. – Vol. 2, part B. – P. 562 – 570.

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

11. Томский К. О. Повышение эффективности работы и износостойкости тормозных устройств путем применения биметаллических материалов: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук / К. О. Томский. – М.: ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени Губкина», 2013. – 24 с.

12. Капралов Н. Ф. Выбор материалов пар трения / Н. Ф. Капралова // Из-ия высш. учебн. завед., Машиностроение, №12, 1977. – С. 28 – 34.

13. Kindrachuk M. V., Volchenko D. A., Volchenko N. A. [et al.] Influence of a water conduit on the wear resistance of materials in friction pairs of brake devices // Phiz. – Khim. Mechanics of materials. – 2017. – 53. №2. P. 135 – 141.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2022.

**Журавльов Дмитро Юрійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газа, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-950-04-18, E-mail: [dmytro.2103@ukr.net](mailto:dmytro.2103@ukr.net).

**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](mailto:pav041284@ukr.net).

**Андрейчиков Євгеній Юрійович** – підполковник, старший викладач кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.

**Савчин Михайло Васильович** - викладач ДВУЗ «Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу», Львівська обл., м. Дрогобич, вул. М. Павлика, 5 б, 82100, Україна.

**Малик Володимир Ярквич** – канд. техн. наук, доцент, викладач ДВУЗ «Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу», циклової комісії «Загальнотехнічних дисциплін», Львівська обл., м. Дрогобич, вул. М. Павлика, 5 б, 82100, Україна. Моб. тел.: [067 305 90 75](tel:0673059075) E-mail: [drreg@ukr.net](mailto:drreg@ukr.net).

*D. Yu. ZHURAVLEV, A. V. PRYSYAZHNY, Ye. Yu. ANDREYCHIKOV, M. V. SAVCHYN, V. Ya. MALYK*

### **INFLUENCE OF DIFFERENT SCHEMES OF PULSE THERMAL ACTION ON THE STATE OF FRICTION PADS OF DISC-PAD BRAKES**

The materials of the article include the following issues: thermal currents during one- and two-sided friction in disc-pad brakes; energy load of disc-pad brakes and their main operational parameters; discussion of results. It is established that the surface-volume temperatures of friction pairs "disk-pad" provide heat distribution in one and two-way supply at high temperature gradients and the difference in energy load is up to 20%. It is shown that the magnitude of the increase in the thickness of the pad lining under one-sided heat exposure depends on the amount and intensity of gaseous pyrolysis products of the binder, did not exceed 0.8% and is much less than the recommended values (not more than 2.5%). Electrothermomechanical friction as a set of physical processes, phenomena and effects in the contact zone of friction pairs of the tribological system is a dissipative process, which is characterized by: heat release, electrification of friction bodies, tribochemical reactions, structural-phase transformations in the surface layers of friction parts. Thermal processes during friction are the main channel of energy dissipation (scattering) and largely determine the nature of the set of physicochemical processes caused by friction in tribosystems and significantly affect the dynamic coefficient of friction, the change of which is considered in mechanical, electrical, thermal and chemical fields. It is advisable to select the materials of friction pairs according to the force of friction, specific loads and contact displacement of their microprojections, as well as energy load, which depend on the physico-mechanical and chemical processes occurring in the contact zone. The estimation of pulsed thermal influence on friction linings and its influence on operational parameters of a disc-pad brake is carried out.

**Keywords:** disc-pad brake, friction pairs, one- and two-way pulse heat supply, dynamic coefficient of friction, linear wear.

#### **Reference**

1. Friksionnoye vzaimodeystviye v elektricheskikh i teplovykh polyakh metallopolimernykh par treniya / A. Kh. Dzhanakhmedov, A. I. Vol'chenko, E. S. Pirverdiyev [i dr.] // Vestnik Azerbaydzhanskoy inzhenernoy akademii. – Baku. – 2014. – №6 (2). – S. 30 – 54.
2. Friksionnyye uzly / [A. A. Petrik, N. A. Vol'chenko, P. Yu. Purgal, D. A. Vol'chenko] Monografiya (nauchnoye izdaniye). V 2-kh tomakh Tom. 1. Kubansk. gosudarstv. tekhnologich. un-t (Rossiya). – Krasnodar, 2003. – 220 s.
3. Friksionnyye uzly / [A. A. Petrik, N. A. Vol'chenko, P. Yu. Purgal, D. A. Vol'chenko] Monografiya (nauchnoye izdaniye). V 2-kh tomakh Tom. 2. Kubansk. gosudarstv. tekhnologich. un-t (Rossiya). – Krasnodar, 2003. – 220 s.
4. Chichinadze A. V. Materialy v trbotekhnike nestatsionarnykh protsessov / A. V. Chichinadze, R. M. Matveyevskiy, E. D. Braun – M.: Nauka, 1986. – 248 s.
5. Chichinadze A. V. Iznosostoykost' friksionnykh polimernykh materialov / A. V. Chichinadze, V. Ya. Belousov, I. M. Bogatchuk – L'vov: Vishcha shkola, 1989. – 144 s.
6. Diskovyye i diskovo-kolodochnyye tormoza v mashinostroyenii / A. Kh. Dzhanakhmedov, D. A. Vol'chenko, D. Yu. Zhuravlev [i dr.] / Tom. 2. Baku: Appostroff-A, 2021. – 392 s.
7. Diskovyye i diskovo-kolodochnyye tormoza v mashinostroyenii / A. Kh. Dzhanakhmedov, D. A. Vol'chenko, M. Ya. Dzhabadov [i dr.] / Tom. 1. Baku: Appostroff-A, 2020. – 376 s.
8. Gudz G. S., Globchak N. V., Kolyasa A. L., Yavorskiy Ya. P. Teplovoy raschet avtomobil'nykh diskovykh tormozov na tipichnykh rezhimakh ispytaniy. – L'vov: Liga – press, 2007. – 126 s. Na ukr. yaz.
9. Perspectives of application of Russian carbon friction composite materials in brakes of aviation wheels. ASME, Intern. Congress, Atlanta, USA, November / [Chichinadze A. V., Bakin A. I., Mozalev V. V., Suvorov A. V.]. – Atlanta, USA, 1996. – Vol. 2, part B. – P. 562 – 570.

---

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

11. Tomskiy K. O. Povysheniye effektivnosti raboty i iznosostoykosti tormoznykh ustroystv putem primeneniya bimetallicheskiykh materialov: Avtoref. dis. ... kandidata tekhn. nauk / K. O. Tomskiy. – M.: FGBOU VPO «Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza imeni Gubkina», 2013. – 24 s.

12. Kapralov N. F. Vybora materialov par treniya / N. F. Kapralova // Iz-ya vyssh. uchebn. zaved., Mashinostroyeniye, №12, 1977. – S. 28 – 34.

13. Kindrachuk M. V., Volchenko D. A., Volchenko N. A. [et al.] Influence of a water conduit on the wear resistance of materials in friction pairs of brake devices // Phiz. – Khim. Mechanics of materials. – 2017. – 53. №2. P. 135 – 141.