

УДК 622.02

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18669

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, М. В. КИДРАЧУК<sup>2</sup>, Я. М. ДЕМ'ЯНЧУК<sup>1</sup>, А. В. ВОЗНИЙ<sup>3</sup>,  
О. С. БУРАВА<sup>1</sup>, А. В. ПРИСЯЖНИЙ<sup>1</sup>, В. В. НИЦУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

<sup>3</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

## СТАДІЇ НАГРІВАННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ ПАР ТЕРТЯ ГАЛЬМІВНИХ ПРИБОРІВ

*Теоретичні та експериментальні дослідження енергонавантаженості різних типів фрикційних вузлів гальм при імпульсному і тривалому режимах гальмування дозволили визначити поверхневий і глибинний градієнти температури, а також темпи нагрівання і вимушеного повітряного охолодження фрикційних елементів і при цьому встановлено: найбільш поширеним при локальному контакті виникаючих полях ліній струмів є термодинамічний потенціал, що включає в себе зовнішні і внутрішні параметри в їх робочих шарах; термо-динамічний потенціал визначається умовами термодинамічної рівноваги трибосистеми і критеріями її стійкості в багатьох процесах, що супроводжуються зміною енергії; локальна ділянка фактичного контакту мікроставів, утворена одночасною дією нормальних і тангенціальних імпульсних навантажень, що викликають електричні та теплові струми, що не повністю зникають при знятті імпульсних питомих навантажень, формуючи фрикційні зв'язки мікроставів; величини поверхневих і глибинних температурних градієнтів та їх обмеження для металічних фрикційних елементів, а також темпи нагрівання та охолодження, знання яких дозволяють перейти до закономірностей зміни теплофізичних параметрів матеріалів пар тертя.*

**Ключові слова:** гальмівні пристрої, пари тертя, мікростави, співвідношення теплофізичних параметрів, поверхневий і глибинний градієнти температури, темп нагрівання та охолодження.

**Вступ.** У процесі інтенсивного електротермомеханічного навантаження пар тертя гальмівних пристроїв, що мають місце на транспорті, технологічному обладнанні тощо, поверхнево-об'ємні температури їх елементів можуть досягти значних величин, при яких суттєво змінюються теплофізичні властивості поверхневих та підповерхневих шарів матеріалів. На їх зміну впливають поверхневі та глибинні температурні градієнти, а також темпи нагрівання та вимушене повітряне охолодження фрикційних елементів гальм.

**Аналіз літературних джерел та стан проблеми.** При розрахунку поверхнево-об'ємних температур або їх задання [1] в умовах нестационарного процесу тертя (при гальмуванні) необхідно вирішувати нелінійне рівняння теплопровідності, причому з різним характером нелінійності, який залежить від того, як змінюються теплофізичні властивості матеріалів з поверхнево-об'ємною температурою. Як показує практика розрахунку температур, при гальмуванні можна користуватися величиною теплофізичних характеристик, взятих за певної середньої ефективної температури. Ця температура визначається шляхом послідовних наближень (ітерацій) з використанням даних щодо зміни теплоємності у функції температури. У цьому кожному кроці розрахунку теплоємність вважається постійною. Такий підхід дуже незручний при

необхідності швидкої оцінки об'ємної температури при гальмуванні, температури фрикційного контакту, так як вимагає проведення однотипних додаткових розрахунків, причому, обсяг їх збільшується пропорційно необхідній точності. Однак не було відзначено участь поверхневого та підповерхневого шару пар тертя гальм у теплообмінних процесах [2].

В роботі [3] при оцінці енергонавантаженості пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів складено співвідношення  $\lambda_1/\lambda_2$  (коефіцієнти теплопровідності),  $c_1/c_2$  (теплоємності),  $Q_1/Q_2$  (кількості теплоти) та  $q_1/q_2$  (питомого теплового потоку), що дозволило за допомогою зазначених співвідношень визначити градієнти поверхнево-об'ємної температури. Однак при цьому нічого не було сказано про темп нагрівання та охолодження металевго фрикційного елемента.

Картина температурного поля в гальмівному диску відіграє велику роль при проектуванні нових та при дослідженні режимів експлуатації існуючих пар тертя гальмівних пристроїв. Однак без знання фрикційної взаємодії мікровиступів металополімерних пар тертя неможливо судити про їх локальні поля. Тому однією з перших завдань щодо локального теплового поля в парі тертя гальмівного пристрою є визначення коефіцієнта розподілу теплового потоку [4]. У більшості випадків цей коефіцієнт приймається постійним і залежить тільки від теплофізичних і геометричних параметрів фрикційної пари, що не завжди зрозуміло і наближено. У більш ґрунтовних дослідженнях враховується також нестационарний характер зміни коефіцієнта розподілу теплового потоку через його локальний характер. Крім того, не враховуються поверхневий та глибинний температурні градієнти та темпи нагрівання та охолодження металевих фрикційних елементів гальм [5].

**Мета роботи** – показати закономірності зміни поверхневих та глибинних температурних градієнтів та темпів нагрівання та примусового повітряного охолодження металевих фрикційних елементів гальм.

**Процеси, що викликають у металополімерних парах тертя взаємозв'язок ліній струмів полів.** Кожному типу взаємодій при електротермомеханічному терті металополімерних пар тертя відповідає певне поле. При цьому одиночний імпульс, що виникає при взаємодії на плямах контакту в металополімерних парах тертя, можна представити як безкінечну суму накладених один на одного негармонічних хвиль. Опис поля в класичній (неквантовій) теорії поля здійснюється за допомогою однієї або декількох (безперервних) функцій поля, що залежать від координати точки  $(x, y, z)$ , в якій вона розглядається, та від часу  $(\tau)$ . При цьому з функцій поля складається вираз для дії та за допомогою найменшої дії принципу можна отримати диференціальне рівняння, що визначає поле. Значення функцій поля в кожній окремій точці (плямі контакту мікровиступу) можна розглядати як узагальнені координати поля. Отже, поле представляється як фізична система з нескінченним числом ступенів свободи. За загальними правилами механіки можна отримати вираз для узагальнених імпульсів поля і знайти щільність енергії та імпульсу за заданий короткочасний проміжок часу. Однак найпростішим методом оцінки полів є їхній потенціал. Найбільш поширеним є термодинамічний потенціал, що характеризує певні функції об'єму  $(V)$ , тиску  $(p)$ , температури  $(T)$ , ентропії  $(S)$ , числа частинок системи  $(N)$  та інші макроскопічні

параметри ( $x_i$ ), що оцінюють стан термодинамічної системи, якою є робочі шари металополімерних пар тертя. До термодинамічного потенціалу належать:

- внутрішня енергія  $U=U(S, V, N, x_i)$ ;

- ентальпія  $H=H(S, p, N, x_i)$ ;

- Гельмгольца енергія (ізохорно-ізотермічний потенціал)  $F=F(V, T, N, x_i)$ ;

- Гіббса енергія (ізобарно-ізотермічний потенціал)  $G=G(p, T, x_i)$ .

Термодинамічні потенціали пов'язані один з одним наступними співвідношеннями:

$$F=U-TS; \quad (1) \quad H=U+pV; \quad (2) \quad G=F+pV. \quad (3)$$

За допомогою термодинамічного потенціалу виражаються умови термодинамічної рівноваги системи та критерії його стійкості.

Здійснювана термодинамічною системою у будь-якому процесі робота визначається зменшенням термодинамічного потенціалу, що відповідає умовам процесу. Так, за сталості числа частинок ( $N=const$ ) в умовах теплоізоляції (адіабатичний процес,  $S=const$ ) елементарна робота  $dA$  дорівнює спаду внутрішньої енергії:  $dA=-dU$ . При ізотермічному процесі ( $T=const$ )  $dA=-dF$  (робота здійснюється не тільки за рахунок енергії, а й за рахунок теплоти, що надходить у систему). Для систем, у яких можливий обмін речовиною з довкіллям (зміна  $N$ ), можливі процеси при постійному  $p$  і  $T$ . У цьому випадку елементарна робота всіх термодинамічних сил, крім сил тиску  $p$ , дорівнює втраті термодинамічного потенціалу Гіббса ( $G$ ), тобто  $dA'=-dG$ . Теоретичне визначення термодинамічного потенціалу як функцій відповідних змінних становить основне завдання статистичної термодинаміки.

### **Фрикційні зв'язки з імпульсними навантаженнями пар тертя.**

Елементарну ділянку фактичного дотику, що утворилася при одночасному дії імпульсних нормальних і тангенціальних навантажень, що супроводжуються імпульсними електричними і тепловими струмами, і не повністю зникає при знятті імпульсних питомих навантажень, називають фрикційним зв'язком.

Розрізняють п'ять видів порушення фрикційних зв'язків [6] і три типи супутньої взаємодії, що впливає на фрикційну втому (табл. 1):

- мікроізнання (скол-зріз матеріалу), коли імпульсні питомі навантаження, що супроводжуються імпульсним електричним та тепловим струмом, досягають руйнівних величин. При цьому порушується режим обтікання мікроставів матеріалом, що деформується і розширюється. Руйнування має місце при першій взаємодії мікроставів поверхонь, що труться;

- пружне відтискання матеріалу, коли імпульсні контактні питомі навантаження менші межі текучості; руйнація є наслідком дії імпульсного електричного та теплового струмів, а також хімічних процесів, що сприяють фрикційній втомі;

- пластичне відтискування матеріалу, що знаходиться в напружено-деформованому стані, коли імпульсні контактні питомі навантаження досягають межі текучості; руйнування є результатом багатоциклової фрикційної втоми;

- адгезійне руйнування плівок, що схоплюються, тобто мікробатарей, за тими ж зонами імпульсної контактної взаємодії, якими раніше реалізовувався зв'язок; супроводжує активні втомні процеси;

- когезійна руйнація основного приповерхневого шару, прошитого електричними та тепловими струмами після першої взаємодії мікроставів; відповідає переходу зовнішнього тертя у внутрішнє.

Утворення та руйнування активних та пасивних фрикційних зв'язків при імпульсному терті сприяє зміні дискретно-контактуючих приповерхневих шарів із плівками. Особливо яскраво проявляється у початковий період роботи (період припрацювання).

Геометричні зміни охоплюють мікрогеометрію поверхні тертя (високі та гострі мікронерівності згладжуються, пологі протяжні мікронерівності стають шорсткими).

Таблиця 1

## Характеристики фрикційних зв'язків

Вид порушення зв'язків				Металополімерні пари тертя				
Характер взаємодії	Механічне			Електричне	Теплове	Хімічне	Молекулярне	
Характер деформування	Мікро-різання	Відтіснення пластичне пружне		Втомний стан поверхневих шарів			Руйнування	
							схоплюючих плівок	основного матеріалу
Число циклів	$n=1,0$	$1,0 < n < \infty$	$n = \infty$	$1,0 < n < \infty$			$n=1,0$	$n=1,0$
Умови здійснення	Без змащення		Чорний метал	Без рідини		З рідиною	$\frac{\partial \tau}{\partial y} > 0$	$\frac{\partial \tau}{\partial y} < 0$
	$\frac{D}{r} > 0,1$	$\frac{D}{r} < 0,1$	$\frac{D}{r} < 0,01$	$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta}\right)_y > 0$	$\frac{\partial T}{\partial \delta} > 0$	$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta}\right)_x > 0$		

У табл. 1 використані наступні умовні позначення:  $r$  - радіус мікровиступів;  $D$  - нормальна контактна деформація;  $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta}\right)_y$  - градієнт електричного струму;  $\partial \varphi$  - елементарна зміна потенціалу щодо елементарної товщини  $\partial \delta$ ;  $\frac{\partial T}{\partial \delta}$  - градієнт температури;  $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta}\right)_x$  - хімічний градієнт;  $\partial \varphi$  - елементарна зміна хімічного потенціалу;  $\partial y$  - елементарна зміна радіусу мікровиступу по осі  $y$ ;  $\frac{\partial \tau}{\partial y}$  - елементарний градієнт дотичного напруження в контакті.

Зміна структури поверхневих шарів елементів тертя металополімерних пар викликана імпульсною дією ряду параметрів на фрикційні зв'язки та обумовлена:

- утворенням та перерозподілом миттєвих вакансій (точкових дефектів) у кристалічному твердому тілі, в яких центрами є активовані атоми на деформовано-напруженій поверхні та на межах зерен (кількість вакансій у вищезгаданому стані у тонкому поверхневому шарі досягає  $10^{21}$  атомів/см<sup>3</sup>, а у звичайних умовах не перевищує  $10^{18}$  -  $10^{19}$  атомів/см<sup>3</sup>);

- розвитком та взаємодією дислокацій, що мають власне поле напружень, щільність яких при імпульсному терті збільшується з  $10^6 - 10^8 \text{ см}^2$  до  $10^{12} \text{ см}^2$ , що призводить до зміцнення поверхневого шару;

- утворенням поверхневих (кордонів: подвійних шарів; зерен; орієнтації зерен та ін.) та об'ємних (скупчень вакансій, порожнин, отворів) дефектів;

- перетворенням кристалічних решіток металу, дифузійних процесів компонентів металу та їх перерозподіл у ньому, фазове перетворення, рекристалізація та ін;

- електростимульованою поляризацією та деполяризацією поверхневих шарів, переорієнтацією молекулярних ланцюгів; фазовим перетворенням першого та другого роду, а також деструкцією та утворенням металополімерних сполук.

Поряд із відомими властивостями [5-8] полімерні матеріали для фрикційних вузлів повинні відповідати особливим вимогам. Вони повинні мати:

- у своїй структурі високу концентрацію молекулярних диполів із великим моментом;

- високий ступінь орієнтування системи диполів;

- фіксацію системи диполів після їхнього орієнтованого вибудовування, забезпечуючи тим самим стабільність;

- у своїй структурі компоненти матеріалів, що утворюють спільно з компонентами матеріалів металевого елемента тертя прості та напівпровідникові мікробатареї, що працюють у режимах мікротермоелектрогенератора та мікротермоелектрохолодильника;

- можливість керування тепловими режимами пар тертя шляхом вибору раціонального кількісного співвідношення між мікротермобатареями-мікротермоелектрогенераторами та мікротермобатареями-мікротермоелектрохолодильниками;

- у структурі полімерних матеріалів міцних та високоактивних плівок з горизонтальною та вертикальною орієнтацією у взаємно перпендикулярних площинах на основі полівініліденфториду (PVDF), полівінілфториду (PVF) та полівінілхлориду (PVC), що є свого роду термоелектричними та електромеханічними перетворювачами.

Коефіцієнт об'ємного розширення приповерхневих шарів аморфної полімерної накладки різко змінюється при температурі провідності, коли пробивається шар електричним розрядом і в ньому циркулює електричний струм. Вище зазначеної температури полімер знаходиться у пластичному стані та має високий коефіцієнт розширення. Після різкого охолодження від високої початкової температури до температури нижче провідності питомий обсяг полімеру залишається великим, так як макромолекули не в змозі швидко змінити свій об'єм, і він залишається таким, яким був у пластичному стані. Відповідно, термодинамічний стан приповерхневого шару полімеру виявляється нестійким і прагне з часом до рівноважного з початковим питомим обсягом.

**Темпи протікання імпульсів електричного та теплового струмів у мікровиступах пар тертя.** Розглянемо темпи протікання імпульсів електричного та теплового струмів у мікровиступах поверхонь тертя металополімерних пар.

Зупинимося на електричних та теплових струмах, що виникають у металополімерних парах тертя. У табл. 2 наведено розрахункові залежності, що

описують електричні та теплообмінні процеси при роботі металополімерних пар тертя [2]. В залежності (4) щодо теплопровідності застосовано темп протікання теплового струму.  $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)$ . Темп накопичення та розсіювання теплоти  $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau}\right)$  використаний у залежності: (5), що описує протікання

Таблиця 2

### Темпи імпульсного протікання електричних та теплових струмів через мікроставупи поверхонь тертя металополімерних пар

Вид енергії		Розрахункові залежності
Електрична		$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = I^2 R'\right)$ (4)
Вид теплообміну	Кондуктивний	$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{(\Delta Q / \Delta \tau)}{mc}$ ; (5)
	Конвективний: вільне та вимушене охолодження	$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \alpha_T (g_n - g_o)\right)$ ; (6)
	випромінювальний	$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = e_1 c_1 A_{nm} (g_n^4 - g_o^4)\right)$ . (7)

електричного струму; (6) і (7), що відносяться до конвективного і випромінювального вимушеного охолодження.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = I^2 R'.$$

Остання залежність пов'язує між собою параметри електричного і теплового полів, струми яких пронизують плями контакту мікроставупів поверхонь, що труться.

При короткочасних гальмуваннях за відсутності тепловіддачі від матових поверхонь шківа відбувається інтенсивне акумулювання теплоти, що може призвести до граничного теплового стану обода. Для спрощеного розгляду завдання теплопровідності нехтуємо тепловіддачею у навколишнє середовище.

У табл. 3 і 4 наведено результати розрахунків параметрів для різних типів металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв, яким властиво наступне:

- стан металевих фрикційних елементів у процесі електротермомеханічного гальмування на початку та в кінці залежить від типу підведення теплоти, стадій недогрятості, рівномірності нагрятості та перегріву в залежності від їх товщини, що є визначником величин температурних градієнтів;

- на стадії перегрівості металевих фрикційних елементів необхідно враховувати їх теплообмін з навколишнім середовищем, а також з поверхневими та підповерхневими шарами полімерних накладок;

- при рівномірній нагрятості товщини металевих фрикційних елементів спостерігається квазірівнювання температурного градієнта, що відповідає їхньому термостабільному стану.

Таблиця 3

Результати розрахунків температурних градієнтів за товщиною та темпами нагрівання елементів пари тертя стрічково-колодкового гальма при імпульсному та тривалому підведенні теплоти в процесі гальмування.

Навантаження тепловими струмами елементів тертя накладки/шківця						
імпульсне						
Інтервали зміни теплофізичних та геометричних параметрів елементів тертя						
$\tau, c$	$\Delta t, ^\circ C$	$a, m^2/c$	$b_{ef}, m$	$\delta, mm$	$\frac{\partial \Delta t}{\partial \delta}, \frac{^\circ C}{mm}$	$\frac{d\Delta t}{d\tau}, \frac{^\circ C}{c}$
$(2,0-14,0) \cdot 10^{-4}$	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{(2,0-6,0) \cdot 10^{-7}}{8,7 \cdot 10^{-6} - 1,08 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{(1,094-5,014) \cdot 10^{-5}}{7,208 \cdot 10^{-5} - 2,127 \cdot 10^{-4}}$	0,4	$\frac{2,5-12,5}{25,0-125,0}$	$\frac{29,9-228,5}{(11,38-167,9) \cdot 10^2}$
				0,6	$\frac{1,67-8,33}{16,67-83,3}$	$\frac{19,9-152,3}{(7,58-111,94) \cdot 10^2}$
				0,8	$\frac{1,25-6,25}{12,5-62,5}$	$\frac{15,0-114,2}{(5,69-83,95) \cdot 10^2}$
				1,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{12,0-91,4}{(4,55-67,16) \cdot 10^2}$
Навантаження тепловими струмами елементів тертя накладки/шківця						
тривале						
Інтервали зміни теплофізичних та геометричних параметрів елементів тертя						
$\tau, c$	$\Delta t, ^\circ C$	$a, m^2/c$	$b_{ef}, m$	$\delta, mm$	$\frac{\partial \Delta t}{\partial \delta}, \frac{^\circ C}{mm}$	$\frac{d\Delta t}{d\tau}, \frac{^\circ C}{c}$
2,0-14,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{(2,0-6,0) \cdot 10^{-7}}{8,7 \cdot 10^{-6} - 1,08 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{(1,094-5,014) \cdot 10^{-3}}{7,2 \cdot 10^{-3} - 2,12 \cdot 10^{-2}}$	0,4	$\frac{2,5-12,5}{25,0-125,0}$	$\frac{0,299-2,285}{11,38-167,9}$
				0,6	$\frac{1,67-8,33}{16,67-83,3}$	$\frac{0,199-1,523}{7,58-111,94}$
				0,8	$\frac{1,25-6,25}{12,5-62,5}$	$\frac{0,15-1,14}{5,69-83,95}$
				1,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{0,12-0,91}{4,55-67,16}$

\* У чисельнику наведені параметри стосовно ободу шківця, а в знаменнику – до фрикційної накладки

**Обговорення результатів.** Теоретичні та експериментальні дослідження енергонавантаженості різних типів фрикційних вузлів гальм при імпульсному та тривалому режимах гальмування дозволили визначити поверхневий та глибинний градієнти температури, а також темпи нагрівання та вимушеного повітряного охолодження фрикційних елементів і при цьому встановили:

- найбільш поширеним при локальному контакті мікроступів у полях ліній струмів, що виникають, є термодинамічний потенціал, що включає в себе зовнішні і внутрішні параметри в їх робочих шарах;

- термодинамічний потенціал визначається умовами термодинамічної рівноваги трибосистеми та критеріями її стійкості у багатьох процесах, що супроводжуються зміною енергії;

Таблиця 4

**Обмеження за температурними градієнтами металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв**

Вид гальмівного пристрою	Металевий фрикційний елемент				
	вентильований:		суцільний:		
Дисково-колодковий	на початку	в кінці	на початку	в кінці	
	гальмування з температурними градієнтами:				
	об'ємними		поверхневими		
	<i>I</i>	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial}} \geq 5,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial r} \geq 20,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial}} \geq 2,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial r} \geq 10,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$
	<i>II*</i>	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial}} \geq 2,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial r} \geq 10,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial}} \geq 1,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial r} \geq 5,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$
	сталевий:		чавунний:		
на початку	в кінці	на початку	в кінці		
Барабанно-колодковий	гальмування з температурними градієнтами:				
	об'ємними		поверхневими		
	<i>I*</i>	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial b}} \geq 8,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial b_{\partial b}} \geq 30,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial b}} \geq 5,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial b_{\partial b}} \geq 18,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$
	<i>II*</i>	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial b}} \geq 4,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial b_{\partial b}} \geq 21,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_v}{\partial \delta_{\partial b}} \geq 3,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$	$\frac{\partial t_n}{\partial b_{\partial b}} \geq 9,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мм}}$

- локальна ділянка фактичного контакту мікровиступів, утворена одночасною дією нормальних та тангенціальних імпульсних навантажень, що викликають електричні та теплові струми, що не повністю зникають при знятті імпульсних питомих навантажень, формуючи фрикційні зв'язки мікровиступів;

- величини поверхневих та глибинних температурних градієнтів та їх обмеження для металевих фрикційних елементів, а також темпи нагрівання та охолодження, знання яких дозволяють перейти до закономірностей зміни теплофізичних параметрів матеріалів пар тертя.

**Висновки.** Таким чином, встановлені закономірності зміни поверхневих та глибинних температурних градієнтів та темпів нагрівання та примусового повітряного охолодження металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв.

**Список літератури**

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.
2. Гинзбург А.Г. Решение задач тепловой динамики и моделирования трения и износа. Статья: Расчет объемных температур при торможении при переменных теплофизических характеристиках материалов пары трения / А. Г. Гинзбург. М.:Наука, 1980, с. 18-22.
3. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпник, И. Я.



Ширали, Э. А, Джанахмедов, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев; под общ. ред. акад. А. Х. Джанахмедова. Стандарт. Баку: Апострофф, 2016. -312 с.

4. Пат. 2647338 С2 РФ, МПК Б160 49/08. Способ оценки внешних и внутренних параметров узлов трения при испытаниях в стендовых условиях / Вольченко Н. А., Вольченко А. И., Киндрачук М. В., Вольченко Д. А., Криштопа С. И., Журавлев Д. Ю., Журавлев А. Ю., Бекиш И. О., Захара И. Я., Кашуба Н. В., Возный А. В., Красин. П. С., Стаднык О. Б. заявитель и патентообладатель Вольченко Николай Александрович, №2015122719; заявл. 11.06.2015; опубл. 15.03.2018, Бюл. №8. 103 с.

5. Крагельский И. В. Современные представления о трении и износ материалов / Крагельский И.В. - В кн.: Исследование структуры фрикционных материалов при трении. - М.: Наука, 1972. - С. 8-16.

6. Крагельский И.В. Фрикционное взаимодействие тел / Крагельский И.В. - Трение и износ т.1, 1980, №1.-С.

7. Трибологія / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.П. Пашечко, Є.В. Корбут / - Київ: Вид-во нац. авіац. ун-ту: «НАУ - друк», 2009. - 392с.

8. Чичинадзе А.В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / Чичинадзе А.В, Белоусов В. Я., Богатчук И. М. / - Львов. - Вища школа, 1989. 114с.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2024

**Вольченко Дмитро Олександрович** – докт. техн. наук, професор кафедри видобування нафти і газу, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: vol21@ukr.net., <https://orcid.org/0000-0002-1565-749X>.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net , <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Дем'янчук Ярослав Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва та енергоефективних споруд, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, +38 034)57-24-04, E-mail: slavdem67@gmail.com.

**Возний Андрій Володимирович** – канд. техн. наук, докторант кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, E-mail: [andrii.voznyi@gmail.com](mailto:andrii.voznyi@gmail.com)., <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>

**Бурава Олександр Степанович** – підполковник, старший викладач кафедри військової підготовки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: burava2012@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1489-7763>.

**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: rav041284@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6894-496X>.

**Ніщук Віктор Вікторович** – майор, викладач кафедри військової підготовки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: nviktorv@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-9142-4738>.

*D. O. VOLCHENKO<sup>1</sup>, M. V. KINDRACHUK<sup>2</sup>, A. V. VOZNYI<sup>3</sup>, O. S. BURAVA<sup>1</sup>,  
A. V. PRYSIAZHNYI<sup>1</sup>, V. V. NISHCHUK<sup>1</sup>*

### STAGES OF HEATING AND COOLING OF FRICTION PAIRS OF BRAKE DEVICES

In the process of intense electrical-thermo-mechanical loading of friction pairs of braking devices, which take place on transport, technological equipment, etc., the surface-volume temperatures of their elements can reach significant values, at which the thermophysical properties of the surface and subsurface layers of materials change significantly. Their change is influenced by surface and deep temperature gradients, as well as heating rates and forced air cooling of friction brake elements. Theoretical and experimental studies of the energy load of various types of friction brake units under pulsed and long-term braking modes made it possible to determine the surface and deep temperature gradients, as well as the rate of heating and forced air cooling of the friction elements, and it was established: the most common with local contact of microprotrusions the emerging fields of current lines is the thermodynamic potential, which includes external and internal parameters in their working layers; the thermodynamic potential is determined by the conditions of thermodynamic equilibrium of the tribosystem and the criteria for its stability in a variety of processes accompanied by changes in energy; a local area of actual contact of microprotrusions, formed by the simultaneous action of normal and tangential impulse loads, causing electric and thermal currents that do not completely disappear when the pulsed specific loads are removed, forming frictional connections of microprotrusions; the magnitude of surface and deep temperature gradients and their limitations for metal friction elements, as well as the rates of heating and cooling, knowledge of which allows us to move on to the patterns of changes in the thermophysical parameters of friction pair materials. The regularities of changes in surface and deep temperature gradients and rates of heating and forced air cooling of metal friction brake elements have been established.

**Key words:** braking devices, friction pairs, microprotrusions, ratios of thermophysical parameters, surface and deep temperature gradients, heating and cooling rates.

### References

1. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / A. V. Chichinadze, E. M. Berliner, E. D. Braun i dr.; Pod obshch. red. A. V. Chichinadze. - M.: Mashinostroenie, 2003. - 576 s.
2. Ginzbur A.G. Reshenie zadach teplovoi dinamiki i modelirovaniya treniya i izno-sa. Statya: Raschet obemnykh temperatur pri tormozhenii pri peremennykh teplofizicheskikh kharakteristikakh materialov pari treniya / A. G. Ginzburg. M.: Nauka, 1980, s. 18-22.
3. Proektnii i proverchnii raschet friktsionnykh uzlov lentoch-no-kolodochnykh tormozov burovikh lebedok / A. X. Dzhanakmedov, D. A. Volchshenko, V. S. Skripnik, I. Ya. Shirali, E. A. Dzhanakhmedov, N. A. Volchenko, D. Yu. Zhuravlev; pod obshch. red. akad. A. X. Dzhanakmedova. Standart. Baku: Apostroff, 2016. - 312 s.
4. Pat. 2647338 S2 RF, MPK B160 49/08. Sposob otsenki vneshnykh i vnutrennykh parametrov uzlov treniya pri ispitaniyakh v sten-dovykh usloviyakh / Volchenko N. A., Volchenko A. I., Kindrachuk M. V., Volchenko D. A., Krishtopa S. I., Zhuravlev D. Yu., Zhuravlev A. Yu., Bekish I. O., Zakhara I. Ya., Kashuba N. V., Voznii A. V., Krasin. P. S., Stadnik O. B. zayavitel i patentoob-ladatel Volchenko Nikolai Aleksandrovich, №2015122719; zayavl. 11.06.2015; opubl. 15.03.2018, Byul. №8. 103 s.
5. Kragelskii I.V. Sovremennye predstavleniya o trenii i iznos materialov / Kragelskii I.V. - V kn.: Issledovanie strukturi friktsionnykh materialov pri trenii. - M.: Nauka, 1972. - S. 8-16.
6. Kragelskii I.V. Friktsionnoe vzaimodeistvie tel / Kragelskii I.V. - Trenie i iznos t.1, 1980, №1.-S.

---

7. Tribologiya / M.V. Kindrachuk, V.F. Lubenets, M.I. Pashechko, Є.V. Korbut / - Київ: Vid-vo nats. aviats. un-tu: «NAU - druk», 2009. - 392s.

8. Chichinadze A.V. Iznosostoikost friktsionnikh polimernikh materialov / Chichinadze A.V., Belousov V. Ya., Bogatchuk I. M. / - Lvov. - Vishcha shkola, 1989. 114s.

**Volchenko Dmytro Oleksandrovych** – Dr. tech. Sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Production, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, st. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, +38 0342 72 71 41, mob. 050-373-82-42, Email: vol21@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-1565-749X>.

**Kindrachuk Myroslav Vasylovych** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Science. tech. Sciences, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, Lyubomir Guzar Ave., 1, Kiev, Ukraine, 03058, +38044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Demyanchuk Yaroslav Mykhailovych** – PhD, associate professor of the department of construction and civil engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, st. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, +38 034)57-24-04, Email: slavdem67@gmail.com.

**Vozniy Andriy Volodymyrovych** – PhD, doctoral student of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkiv, 61002, E-mail: andrii.voznyi@gmail.com., <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>

**Burava Oleksandr Stepanovych** – lieutenant colonel, senior lecturer at the department of military training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, st. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, phone: +38 0342 50 25 06, E-mail: burava2012@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1489-7763>

**Pryyazhny Andriy Volodymyrovych** – major, academician of the department of military training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, vul. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, E-mail: pav041284@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6894-496X>.

**Nishchuk Viktor Viktorovych** – major, academician of the department of military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, vul. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, tel.: +38 0342 50 25 06, E-mail: nviktorv@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-9142-4738>.