УДК 621.1 - 016 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21631

М. В. КІНДРАЧУК[1], В. С. СКРИПНИК[2], Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ[3],

Є. Ю. АНДРЕЙЧИКОВ[3], О. С. БУРАВА[3] , В. В. НІЩУК[3], А. В. ПРИСЯЖНИЙ[3]

[1]Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна
[2]Надвірнянський фаховий коледж Національного транспортного університету
[3]Івано-Франківський національний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ОСНОВНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ПАРАМЕТР ПРИ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ ТЕРТІ У ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЯХ

У матеріалі статті запропоновано алгоритм визначення ентропії, який є комплексним параметром нерівноважної триботермодинаміки для уточненого їх впливу в парах пар тертя гальмівних пристроїв. Ентропія є комплексним параметром стану трибосистеми, що включають кількість теплоти, яка генерується на ділянках плям контактів макровиступів пар тертя, імпульсних питомих навантажень, поверхнево-об'ємних температур і об'ємів матеріалів поверхневих і приповерхневих шарів полімерних накладок. В основу досліджень закладено той принцип, що вся робота імпульсних сил тертя при фрикційній взаємодії пар у вузлах тертя перетворюється на теплоту, при цьому можливі випадки в спряжених парах тертя виникнення ізотермічних, ізобарних і ізохорних процесів, і як наслідок, ізоентропійних явищ, що дозволяє мати рівноважну триботермодинаміку. Наведено зміну ентропії при різному стані поверхнево-об'ємної маси фрикційної накладки вузла тертя гальма

Ключові слова: *гальмовий пристрій, пара тертя, нерівноважна триботермодинаміка, ентропія, комплексний параметр, динамічний коефіцієнт тертя.*

Вступ. Природа внутрішньої незворотності енергії в парах тертя при їх фрикційній взаємодії пов'язана із закономірністю: робота сил тертя перетворюється повністю на теплоту, теплота на роботу – частково. У реальній трибосистемі відбувається нагрівання елементів тертя та їх енергообмін з омиваючим середовищем. А там, де йдеться про теплоту, незмінно з'являється і ентропія. Як і інші функції стану, ентропія повністю визначається станом трибосистеми, та її зміна залежить від режиму гальмування.

Ентропія є потенціалом корисної роботи сил тертя у фрикційному вузлі. За своєю структурою і відповідно до змісту поняття потенціалу ентропія є функцією стану (комплексний термодинамічний параметр) залежної від імпульсного питомого навантаження в парах тертя, поверхнево-об'ємної температури та об'ємів поверхневих і приповерхневих шарів полімерної накладки. Ентропія трибосистеми залежить значною мірою від зміни динамічного коефіцієнта тертя в тепловому полі спряження «метал – полімер» гальма.

Аналіз літературних джерел та стан проблеми. Розробці математичних моделей інтенсивності зношування трибоспряжень присвячені роботи І. В. Крагельського [1], Б. І. Костецького [2], Г. Польцера, Ф. Майснера [2] та ін.

В роботі [3] при розгляді трибомоделі спряження пар тертя береться до уваги відповідно до математичної моделі, в яку включають збуджені енергетичні об'єми поверхневих і приповерхневих шарів фрикційної взаємодії. При цьому враховувався лише хімічний потенціал, величина якого проявляється лише при

деструкції поверхневого шару полімерної накладки.

Повній зміні ентропії, яка складається з внутрішньої, властивої поверхневим і приповерхневим робочим шарам пар тертя і зовнішньої, яка обумовлена зовнішнім охолоджуючим середовищем (атмосферним повітрям, стиснутим повітрям, рідиною) присвячена робота [4]. Однак, не було вказано з яким саме охолоджуючим середовищем випробовувалися пари тертя.

Нерівноважна трибологія у фрикційних парах тертя гальмівних пристроїв виявляється у безперервній зміні внутрішніх та зовнішніх експлуатаційних параметрів у їх поверхневих та при поверхневих шарах при электротермомеханическом терті [5]. Однак не було приділено увагу комплексному параметру ентропії, який характеризує внутрішній та зовнішній енергостан у спряжених парах тертя гальма.

Мета роботи – показати зв'язок ентропії з іншими параметрами в нерівноважній термодинаміці, а також вплив на її поведінку динамічного коефіцієнта тертя, який знаходиться у тепловому полі спряження пар тертя гальмівних пристроїв.

Ентропія – комплексний параметр нерівноважної триботермодинаміки.

Ентропія – (від грец. entropia – поворот, перетворення); поняття введене в термодинаміці визначення міри незворотного розсіювання енергії. Алгоритм визначення ентропії в парах пар тертя гальмівних пристроїв показаний на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм визначення ентропії у сполученнях гальмівних пристроїв

Відповідно до першого початку термодинаміки, $\delta Q = dU+pdV$, тобто, кількість теплоти, що надходить до системи, дорівнює сумі приросту внутрішньої енергії dU і здійснюване системою елементарної роботи PdV (де P - імпульсні

питомі навантаження; *dV* - елементарний об'єм поверхневих і приповерхневих шарів полімерної накладки). З урахуванням першого початку термодинаміки диференціал визначення ентропії набуває вигляду:

$$dS = \frac{1}{T}\left(dU + PdV\right), \tag{1}$$

звідки випливає, що ентропія є термодинамічний потенціал при виборі в якості незалежних змінних внутрішньої енергії поверхневого шару накладки та її об'єму *V*. Часткові похідні ентропії пов'язані з *T* і *P* залежностями

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V \quad (2) \quad \text{та} \quad \frac{P}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_U, \quad (3)$$

які визначають рівняння стану трибосистеми (перше – калоричне, друге – термічне). Рівняння (2) закладено в основу визначення абсолютної температури (*T*).

Природа внутрішньої незворотності пов'язана із становищем: робота може бути перетворена на теплоту повністю, теплота – на роботу – лише частково. Робота, що здійснюється проти імпульсних сил тертя при фрикційній взаємодії у вузлах тертя, повністю переходить у теплоту. Насправді теплота йде на нагрівання локальних зон макровиступів плям контактів елементів тертя та їх вимушене охолодження. При цьому процес перетворення теплоти на роботу підпорядковується певійї фізичній закономірності – другому початку термодинаміки, яке формулюється математично, якщо ввести особливий комплексний параметр – ентропію. Так, для трибосистеми, якою є пари тертя гальма при регламентованих циклічних гальмуваннях транспортного засобу, в якій вона отримує незначну кількість теплоти за одне гальмування $\delta Q/T$ після всіх гальмувань дорівнює $\Sigma\delta Q/T$.

Математично рівність Клаузіуса необхідна і достатньо для того, щоб

$$dS = \delta Q/T \tag{4}$$

являло собою повний диференціал функції стану S, назване ентропією (диференціальне визначення). Різниця поверхневих ентропій трибосистеми у двох довільних станах A і B (заданих напрямком) значеннями поверхнево-об'ємних температур та об’ємів при нерівномірному зносі робочих поверхні полімерної накладки дорівнює:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} \tag{5}$$

(Інтегральне визначення ентропії), яке є поверхневим ентропійним градієнтом.

Рівняння (А) лежить в основі визначення абсолютної поверхнево-об'ємної температури полімерної накладки. Відповідно до третього початку термодинаміки, ґрунтуючись на якому, за початок відліку приймаємо тоску на плямі контакту макровиступу, де ентропія So = 0 при T = 0.

Таким чином, з другого початку термодинаміки випливає, що існує однозначна функція стану при ізотермічному, ізобарному та ізохорних процесах в спряженні пар тертя коли δQ=0 залишається постійною. Процеси, у яких ентропія залишається постійною, називаються ізоентропійними. При ізотермічних процесах зміна ентропії дорівнює відношенню відповідної трибосистеми теплоти до абсолютної поверхнево-об'ємної температури полімерної накладки. Зміна ентропії при досягненні матеріалами накладки поверхнево-об'ємної температури вище допустимої, коли в її робочому шарі

з'являється випаровуюча рідина, рівно відношенню теплоти випаровування до температури випаровування за умови рівноваги рідини з її насиченою парою.

Ентропія в статистичній фізиці постає як міра взаємодії макровиступів пар тертя та їх стану.

У теорії інформації як міра оцінки невизначеності одиничного експерименту з енергонавантаженості пар тертя, який може мати різне пояснення. Ці трактування ентропії мають міцний внутрішній зв'язок. Так, на основі отриманої інформації про експеримент можна вивести закономірності зміни експлуатаційного параметра пар тертя за допомогою положень статистичної фізики.

Статистична фізика пов'язує з ймовірністю досягнення даного макроскопічного стану трибосистемою. При цьому ентропія визначається через логарифм статистичної ваги Ω даного рівноважного стану.

$$S = k \ln \Omega (\varepsilon, N), \quad (6)$$

де Ω (ε, N) – число квантомеханічних рівнів у вузькому інтервалі енергії $\Delta\varepsilon$ поблизу значення енергії ε трибостистеми; Ω – величина об'єму поверхневого та приповерхневого шару полімерної накладки у фазовому просторі спряження трибосистеми при заданих ε та N.

На відміну від термодинаміки, статистична фізика розглядає особливий клас явищ – флуктуації, за якої трибосистема переходить із більш ймовірнішого стану у менш ймовірний, та її енергія зменшується. Наявність флуктуацій показує, що закономірності збільшення ентропії спостерігаються при тривалому режимі гальмування транспортного засобу за великий проміжок часу.

Параметри ентропії, як і термодинамічні, володіють властивістю адитивності. З імовірнісного трактування експлуатаційних параметрів пар тертя гальмівних пристроїв для ентропії на їх основі можуть бути отримані розподіли статистичної фізики: канонічний розподіл Гіббса, який відповідає максимальним значенням ентропії при заданій середній енергії і великий канонічний розподіл Гіббса - за заданих середньої енергії та число електронів та іонів на поверхнях спряжених пар тертя гальма.

Поняття ентропії застосовується і до термодинамічно нерівноважним станам робочих поверхонь контактування пар тертя, якщо відхилення від термодинаміки рівноваги невеликі і можна вести уявлення про локальну термодинамічний рівновагу в малих об’ємах макровиступів пар тертя. У цілому ентропія нерівноважної трибосистеми дорівнює сумі її частин, що знаходяться у локальній рівновазі.

Термодинаміка нерівноважних процесів дозволяє більш детально досліджувати процес зростання ентропії, обчислити її кількість, що утворюється за одиницю часу в одиницю об’єму в поверхневому і приповерхневому шарі полімерної накладки внаслідок відхилення від термодинамічної рівноваги є виробництвом ентропії.

Важливість поняття незворотних (нерівноважних) процесів також було показано вперше Клаузіусом. Для незворотних процесів інтеграл від наведеної теплоти δQ/T по замкнутому шляху завжди негативний: $\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$ - нерівність Клазіуса.

Термодинамічна рівновага ізотермічної трибосистеми відповідає стану із середньою ентропією. Остання може мати не один, а кілька максимумів, при

цьому трибосистема матиме кілька станів рівноваги. Рівновага, якій відповідає найбільший максимум ентропії, називається абсолютно стійкою (метастабільною). Термостабілізація металевих фрикційних елементів можлива за умови мінімальних температурних градієнтів за їх товщиною та максимальною ентропією поверхневих та приповерхневих шарів полімерних накладок.

У табл. 1 наведені співвідношення між параметрами ентропії та енергетичними рівнями пар тертя гальм.

Таблиця 1

Зв'язок ентропії з іншими термодинамічними параметрами та деякі співвідношення між похідними функціями

Ентропія P = const		T=const	V = const	S = const	U = const	F = const	G = const
(∂S), Дж/(моль·К)	C_P/T	αV	$-C_V\beta V/T$	$C_V\beta PV/T$	$C_P V/T$	$(C_V\beta P-\alpha TS)V/T$	$(C_P-\alpha TS)V/T$

У табл. 1 використовували такі позначення:

P, T, V – імпульсні питомі навантаження, поверхнево-об'ємна температура, об'єм;

S, U, F, G - енергії: ентропії, внутрішня, Гельмгольця, Гіббса;

C_P, C_V – теплоємності при постійних: імпульсних питомих навантаженнях, об'ємі;

- залишковий об'єм; $\alpha=(RT/p - V)$; R – універсальна газова стала;

$\beta = h/k$; h – постійна Планка; k – константа Больцмана.

Отже, мінімальне збільшення ентропії системи може бути досягнуто під час виконання двох умов:

- при мінімальному темпі виникнення ентропії у цій системі (трибосистемі);

- при максимальному відтоці (дисипації) ентропії з цієї системи за рахунок обміну з навколишнім середовищем.

Так, при розробці металополімерних трибосистем запропоновано комплекс вимог до складу, структури та властивостей матеріалу, що забезпечує мінімізацію накопичення ентропії в трибосистемі [8].

Перехід трибосистеми з нерівноважного термодинамічно нелінійного стану пов'язаний з утворенням дисипативної поверхневої структури, що відбувається внаслідок самоорганізації. Для реалізації процесу самоорганізації потрібні відповідні умови. Завдання створення таких умов повинно вирішуватися під час вибору та розробки матеріалів трибосистем для конкретних умов тертя, конструкцій деталей пар тертя [9-10].

Енергонавантаженість дискретного контакту макровиступів металополімерних пар тертя трибосистеми. Поряд з комплексним параметром ентропією, який спостерігається у спряженнях пар тертя та в їх приповерхневих шарах комплексним параметром також є динамічний коефіцієнт тертя, що встановлює зв'язок між змінною імпульсною нормальною силою та імпульсною коловою силою тертя [11-12].

Розглянемо стан міжконтактного середовища поверхневого та приповерхневого шарів металополімерних пар при електротермомеханічному терті. Для цього визначимо стан поверхневого та приповерхневого шару накладки нижче поверхнево-об'ємної допустимої температури.

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 тим самим їх руйнуванню.

Під дією зростаючих імпульсних питомих навантажень відбувається активна деформація макровиступів, тобто поверхневих шарів полімерних накладок та зміцнення плям контактів металевого фрикційного елемента. На цій стадії відбувається підготовка поверхневих шарів до утворення достатньої кількості активних центрів, що визначають їх розвиток внаслідок повзучості металу плям контактів макровиступів. При цьому має місце інжектуючий контакт. При підвищенні температури плям контактів макровиступів металополімерних пар тертя трибоспряження від 100 до 200 ° С спостерігається коливання динамічного коефіцієнта тертя (від 0,39 до 0,42) [див. рис. 2]. При цьому електричні поля у трибоспряженні слабшають, а теплові поля - посилюються. Характеристика фрикційної теплостійкості на цій ділянці визначається переважно пружнопластичними властивостями матеріалу (перехід від пружного до пластичного контакту). На ділянці від 200 до 350 °С коефіцієнт тертя залежить від розвитку пластичних деформацій з поступовим, у міру підвищення температури, димленням зв'язуючого (смоли) полімерних матеріалів. Мікроконтакти за енергетичними характеристиками наближаються до нейтральних.

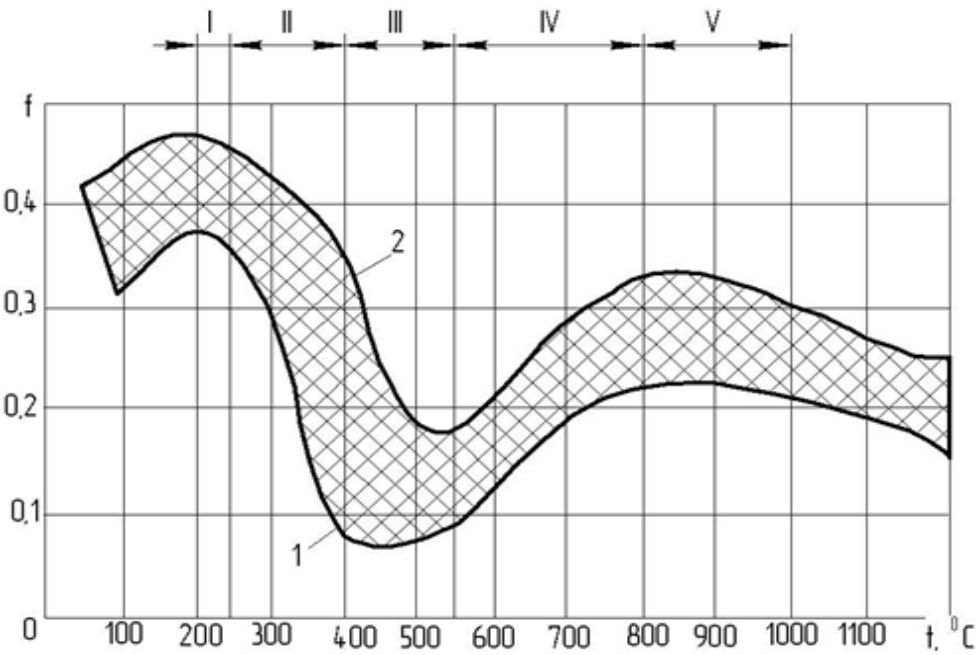


Рис. 2 Еталонна зміна коефіцієнта тертя матеріалу «Ретинакс» ФК-24А функції температури поверхні тертя по зонах: I – 200…250 °С; II - 250 ... 400 °С; III - 400 ... 550 °С; IV - 550 ... 800 °С; V - 800 ... 1000 °С

Таблиця 2

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

Номер проби	Фрикційний матеріал	Температура, °С	Вміст газа, мас. частка, %						
			H_2	O_2	N_2	CO_2	CO	$\sum C_nH_m$	Інші гази***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	Решта
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 (точок) одночасно.

***Під іншими газами мається на увазі: Ar, Ne, He, Kr, N_2O, Xe, O_2, Rn

Виникає подвійний електричний шар, охоплюючий виступи та западини мікронерівностей металевого фрикційного елемента. При цьому плями контактів мікровиступів виконують функції термоелектрогенератора, а поверхневі та приповерхневі шари полімерних накладок - термоелектрохолодильників. Бічні поверхні мікровиступів та його западини є накопичувачами зарядів, тобто. мікроконденсаторами. Інтенсивно відбуваються на плямах поляризаційні процеси.

Струм електризації спрямований від плям контактів мікровиступів полімерної накладки до плям контактів мікровиступів металевого фрикційного елемента тертя.

Електрична енергія, що генерується, перетворюється на теплову енергію і нагріває тіло металевого фрикційного елемента і приповерхневі шари полімерних накладок. В інтервалі поверхневих температур 100 - 200 °С спостерігається тепловий встановившийся стан в спряженні.

Мікровиступи пар тертя омиваються повітрям навколишнього середовища на неробочій поверхні металевого фрикційного елемента в залежності від частоти обертання формується динамічний повітряний шар, який діє більше, ніж тепловий шар.

Цікава картина відбувається, коли стан поверхневого та приповерхневого шару накладки вищий за поверхнево-об'ємну допустиму температуру. Тоді електротермомеханічне тертя протікає при підвищених і знижених питомих імпульсних навантаженнях на плямах контактів мікровиступів трибоспряження. При цьому проявляються закони невстановленої повзучості в умовах постійної зміни (зазвичай зменшення) термонапружень у поверхневому шарі металевого елемента тертя (див. рис. 2, стадія III). На ділянці від 450 до 600 ° С підвищення коефіцієнта тертя пояснюється утворенням коксоподібних продуктів деструкцій зв’язуючого, що зумовлює формування робочого шару. Останній сприяє виникненню блокуючих контактів мікровиступів трибоспряження. При температурах (600...800) °С і вище динамічний коефіцієнт тертя стабілізується і досягає значення 0,32 (див. рис. 2). Інтенсифікуються деполяризаційні процеси на плямах контактів мікровиступів трибоспряження. Азот та вуглекислий газ (табл. 2) є нейтральними середовищами, в яких адсорбційний та щілинний ефекти

вироджуються. При цьому спостерігається збільшення H_2 до 0,171% у масових частках та поява CO (0,43% у масових частках).

Виникає та розвивається сильний подвійний електричний шар у приповерхневих шарах полімерних накладок та слабкий подвійний електричний шар на мікровиступах металевого елемента тертя через їх нагрівання. Приповерхневий шар накладки виконує функції термоелектрогенератора, а мікровиступи металевого елемента тертя - термоелектрохолодильника.

Переважає інверсія електричних струмів від плям контактів мікровиступів металевого елемента тертя в поверхневі шари полімерних накладок. Слабка інверсія прямих струмів обумовлена зародженням зворотних струмів. На поверхні полімерної накладки виникають острівці рідини, що є електролітом. При цьому починається формування сильного електричного подвійного шару на робочій поверхні накладки.

Мікровиступи пар тертя омиваються повітрям навколишнього середовища та компонентами деструкційних процесів, що відбуваються у приповерхневих шарах накладки.

Процес електротермомханічного тертя, реалізований гальмівним пристроєм (стрічково-дисково-барабанно-колодковим), може бути як нетривалим (одиничне гальмування) так тривалим і тривалим (циклічне та тривале гальмування). Від тривалості процесу залежать генеровані струми на поверхні тертя фрикційних вузлів, кількість виникаючої теплоти і глибина проникнення теплових хвиль по товщині металевого елемента тертя. Виходячи з вищевикладеного і пропонується до розгляду імпульсне та тривале підведення теплоти до елементів трибоспряження.

Взаємозв'язок між темпом нагрівання обода шківа і градієнтом температури за його товщиною встановлюємо за допомогою керуючої функції.

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{A_1 \lambda}{cm} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial r} = \frac{QrR}{cm\left(R^2 + z_T^2 + 2kBi \cdot d\tau\right)}, \qquad (7)$$

де Q - кількість теплоти, що акумулюється на поверхнях металополімерних пар тертя гальма; R - радіус зовнішньої поверхні обода шківа; z_T - координата по ширині обода шківа; r – поточний радіус обода шківа; A_1, A_2 - площі матових та полірованої поверхонь шківа; $k = A_2/A_1$; c, m - теплоємність матеріалу та маса обода гальмівного шківа; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу обода шківа; Bi – критерій Біо.

Однак, в залежності (7) необхідно ввести величину δ, тобто товщину поверхневого та приповерхневого шарів фрикційних елементів для більш точної їхньої оцінки нагрітості. Для цього скористаємося підстановкою $\alpha = \lambda/(c\rho)$ (де ρ – густина фрикційних матеріалів) та $V = A_1\delta$ (де V – робочий об'єм фрикційного матеріалу). В результаті підстановок і перетворень отримуємо

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{a_ш}{b_ш} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial b_ш} = \frac{QrR}{cm\left(R^2 + z_T^2 + 2kBi \cdot d\tau\right)}, \qquad (8)$$

Проведемо аналіз залежності (8) за параметрами. Збільшення робочої (полірованої) площі обода шківа сприяє зростанню його металоємності, тому що збільшується і його товщина, і як наслідок, момент інерції. При цьому товщина

обода (δ) гальмівного шківа визначається через регламентований його момент інерції ($I_{Ш}$)

$$\delta = \frac{2I_{Ш} \cdot g}{\pi\left(R_{Ш}^4 - R_B^4\right)\gamma},$$

де g – прискорення вільного падіння; R_B - радіус внутрішньої поверхні обода гальмівного шківа; γ - питома вага матеріалу обода шківа.

Діаметр гальмівного шківа визначається з умови досягнення стрічково-колодковим гальмом моменту, що забезпечує спуск свічок у свердловину максимальної ваги, а також утриманні їх на вазі.

Збільшення коефіцієнта теплопровідності, а разом з ним і температуропровідності матеріалів обода шківа викликає швидкий прогрів за його товщиною, і як наслідок, зменшення температурного градієнта. Якщо позначити постійне доданок $\frac{A_1\lambda}{cm} = b$, то можна встановити зв'язок між темпом нагрівання $\left(\frac{d\Delta t}{dt}\right)$ і градієнтом температури $\left(\frac{d\Delta t}{\partial b_ш}\right)$, що має місце на робочій поверхні обода шківа.

Щодо залежності (8), то тут дещо інша картина. Значення закономірності зміни коефіцієнта температуропровідності матеріалів обода шківа від температури, а також часу проникнення теплоти в шари обода шківа дозволяє більш точніше, ніж у першому випадку визначати відношення ($a_ш/b_ш$).

При цьому використовується залежність, запропонована А.В. Чичинадзе, вигляду $b_{ш.еф} = 1{,}73\sqrt{a_ш \tau}$ (для обода шківа) і $b_{н.еф} = 1{,}73\sqrt{a_н \tau}$ (для полімерної накладки) для визначення ефективної ширини обода гальмівного шківа та фрикційної накладки.

Обговорення результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження основних експлуатаційних комплексних параметрів (динамічного коефіцієнта тертя та ентропії), що є «барометром» стану спряжених, фрикційно взаємодіючих пар «метал - полімер» при електротермомеханічному терті дозволили встановити таке:

- динамічний коефіцієнт тертя є комплексним параметром, що залежить від імпульсних колових сил тертя та нормальних притискних зі своїми неординарними властивостями в теплових полях нижче і вище за допустиму температуру для матеріалів фрикційної накладки, що впливають на експлуатаційні параметри ентропії;

- запропоновано алгоритми визначення ентропії, який є комплексними параметрами нерівноважної термодинаміки та уточнено її вплив на енергетичний рівень пар тертя гальмівних пристроїв;

- ентропія є комплексним параметром стану трибосистеми, що включають: кількість теплоти, яка генерується на осередкових ділянках контактів макровиступів пар тертя, імпульсних питомих навантажень, поверхнево-об'ємних температур та об’ємів матеріалів поверхневих та приповерхневих шарів полімерних накладок;

- в основу досліджень закладено принцип про те, що вся робота імпульсних сил тертя при фрикційній взаємодії пар у фрикційних вузлах перетворюється на теплоту, при цьому можливі випадки виникнення ізотермічних, ізобарних та ізохорних процесів, і як наслідок, ізоентропійних явищ, що дозволяє мати рівноважну термодинаміку.

Висновки. Таким чином, встановлений взаємозв'язок між динамічним коефіцієнтом тертя, що знаходиться в теплових полях пар тертя гальмівних пристроїв та ентропією.

Список літератури

1. Трибологія: тертя, знос, змащування / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко та ін. // Баку: «Апостроф-А», 2019. 640 с.

2. Ehlers H.-R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen, 2002, no. 6/7, pp. 290-300.

3. Венцель Е. С., Щукін О. В. Математична модель трибо-сполучень з позицій нерівно-твагової термодинаміки / Підйомно-транспортна техніка. - Одеса, №2, 2017. - С-1-5.

4. Венцель Є. С., Щукін О. В., Орел А. В. Рівняння інтенсивності зношування трибосполучень з позицій нерівноважної термодинаміки / Підйомно-транспортна техніка. - Одеса, №3, 2017. - С. 62-68.

5. Журавльов Д. Ю. Нерівноважна трибологія при фрикційній взаємодії пар тертя гальмівних пристроїв (частина перша). / Проблеми тренування та зношування. – К., №4, 2015. – С. 43 – 49.

6. Проєктний та перевірний розрахунок фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок. Стандарт / А.Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, І.Я. Ширалі, Е.А. Джанахмедов, В. С. Скрипник. – Баку, Апострофф, 2016.-312 с.

7. Aliyev A. M. Qazima qurgusu qaldirma komplcksinin termomexaniki yiiklanmasi. Baki. Elm. 1 - 132 s.

8. Canahmadov A. X., Valiyev N. A., Aliyev A. M. Neft avadanhqlarmin dinamikasi va mohkomlm Baki: APOSTROFF, 2016. 424 s.

9. Janahmadov A. Kh., Volchenko A. I., Pirverdiev E. S., Volchenko D. A. Skrypnyk V. S., Chufus V. M. Prinuditelnoe ohlazhdenie tribosistemy lentochno-kolodochnogo tormoza burovoj lebedki (chast 3) / Vestnik Azerbaijanskoj inzhenernoj akademii. 2018. T.10, №E S. 16-2.

10. Джанахмедов А. Х., Вольченко А. І., Первердієв Е. С., Вольченко Д. А., Скрипник В. С., Чуфус В. М. Примусове охолодження трибосистеми стрічково-колодкового гальма бурової лебідки (частина ІІ) // Вісник Азербайджанської Баку, 2017. № 9 (4). С. 7. - 18.

11. Проєктний та перевірочний розрахунок фрикційних вузлів барабанно- та дисково-колодкових гальм транспортних засобів / А. Х. Джанахмедов, Дж. Ф. Єурбанов, О. І. Вольченко, А. В. Возний, О. Б. Стадник. За загальною ред. акад. А.Х. Джанахмедова. Стандарт. Баку: «Апострофф», 2016. – 272 с.

12. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903.

Отримано: 14 вересня 2026
Прийнято: 16 вересня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Кіндрачук Мирослав Васильович – докт. техн. наук, член-кореспондент НАН України, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ Україна, nau12@ukr.net. https://orsid.org/0000-0002- 0529-2466

Скрипник Василь Степанович – докт. техн. наук, професор, кафедри автомобільного транспорту Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел..: +38 067 369 66 50, E-mail: skripnik-vs07@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9023-6524

Журавльов Дмитро Юрійович – докт. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел..: +38 0342 72 71 41, докторант кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, м. Харків, Україна, моб. 050- 950-04-18, E-mail: dmytro.2103@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-2045-9631.

Андрейчиков Євген Юрійович – підполковник, старший викладач кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, https://orcid.org/0000- 0002-4579-3636.

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.

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.

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 https://orcid.org/0000-0002-6894-496X.

Kindrachuk Myroslav Vasyliovych - Dr. technical Sciences, corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute".

Scrypnyk Vasyl Stepanovych - Dr. technical of Sciences, professor, department of road transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Dmytro Zhuravlov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics, Engineering and Computer Graphics Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Doctoral Student of the Department of Construction and Road Machinery of the Kharkiv National Automobile and Road University.

Yevhen Andreychikov – Lieutenant Colonel, Senior Lecturer of the Department of Military Training Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Oleksandr Burava – senior lecturer, lieutenant colonel of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Viktor Nishchuk – Major, Lecturer, Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Andriy Prysyazhny – Major, Lecturer, Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine

M. V. KINDRACHUK, V. S. SCRYPNYK, D. Yu. ZHURAVLOV, Ye. Yu. ANDREJCHIKOV, O. S. BURAVA, V. V. NISHCHUK, A. V. PRYSYAZHNY

MAIN COMPREHENSIVE OPERATING PARAMETER FOR ELECTROTHERMOMECHANICAL FRICTION IN BRAKE DEVICES

The article proposes an algorithm for determining entropy, which is a complex parameter of non-equilibrium tribothermodynamics for their refined influence in pairs of friction pairs of brake devices. Entropy is a complex parameter of the state of the tribosystem, including the amount of heat generated in the areas of contact spots of macroprotrusions of friction pairs, impulse specific loads, surface-volume temperatures and volumes of materials of surface and near-surface layers of polymer linings. The research is based on the principle that all the work of impulse friction forces during frictional interaction of pairs in friction nodes is converted into heat, while cases of isothermal, isobaric and isochoric processes in conjugated friction pairs are possible, and as a result, isentropic phenomena are possible, which allows for equilibrium tribothermodynamics. The change in entropy is given for different states of the surface-volume mass of the friction lining of the brake friction node

Keywords: brake device, friction pair, non-equilibrium tribothermodynamics, entropy, complex parameter, dynamic friction coefficient.

References

1. Trybolohiya: tertya, znos, zmashchuvannya / A. X. Dzhanakhmedov, D. A. Vol′chenko, N. A. Vol′chenko ta in. // Baku: «Apostrof-A», 2019. 640 s.

2. Ehlers H.-R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen, 2002, no. 6/7, pp. 290-300.

3. Ventsel′ Ye. S., Shchukin O. V. / Pidyomno-transportna tekhnika. - Odesa, №2, 2017. - S-1-5.

4. Ventsel′ Ye. S., Shchukin O. V., Orel A. V. Rivnyannya intensyvnosti znoshuvannya trybospoluchen′ z pozytsiy nerivnovazhnoyi termodynamiky / Pidyomno-transportna tekhnika. - Odesa, №3, 2017. - S. 62-68.

5. Zhuravl′ov D. Yu. Nerivnovazhna trybolohiya pry fryktsiyniy vzayemodiyi par tertya hal′mivnykh prystroyiv (chastyna persha). / Problemy trenuvannya ta znoshuvannya. – K., №4, 2015. – C. 43 – 49.

6. Proyektnyy ta perevirnyy rozrakhunok fryktsiynykh vuzliv strichkovo-kolodkovykh hal′m burovykh lebidok. Standart / A.Kh. Dzhanakhmedov, D. A. Vol′chenko, I.Ya. Shyrali, E. A. Dzhanakhmedov, V. S. Skrypnyk. – Baku, Apostroff, 2016.-312 s.

7. Aliyev A. M. Qazima qurgusu qaldirma komplcksinin termomexaniki yiiklanmasi. Baki. Elm. 1 - 132 s.

8. Canahmadov A. Kh., Valiyev N. A., Aliyev A. M. Neft avadanhqlarmin dinamikasi va mohkomlm Baki: APOSTROFF, 2016. 424 s.

9. Janahmadov A. Kh., Volchenko O. I., Pirverdiev E. S., Volchenko D. A. Skrypnyk V. S., Chufus V. M. Prinuditelnoe ohlazhdenie tribosistemy lentochno-kolodochnogo tormoza burovoj lebedki (chast 3) / Vestnik Azerbaijanskoj inzhenernoj akademii. 2018. T.10, №E S. 16-2.

10. Dzhanakhmedov A. Kh., Vol′chenko O. I., Perverdiyev E. S. Prymusove okholodzhennya trybosystemy strichkovo-kolodkovoho hal′ma burovoyi lebidky (chastyna II) // Visnyk Azerbaydzhans′koyi Baku, 2017. № 9 (4). S. 7. - 18.

11. Proyektnyy ta perevirochnyy rozrakhunok fryktsiynykh vuzliv barabanno- ta dyskovo-kolodkovykh hal′m transportnykh zasobiv / A. Kh. Dzhanakhmedov, Dzh. F. Yeurbanov, O. I. Vol′chenko, A. V. Voznyy. Standart. Baku: «Apostroff», 2016. – 272 s.

12. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903.