

УДК 541.43.0015

DOI: 10.18372/0370-2197.4(105).19390

А. В. ВОЗНИЙ^{1, 2}, О. М. ВУДВУД³¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу, м. Івано-Франківськ, Україна² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна³ Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

ТЕПЛОВА ДИНАМІКА ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ

Теоретичні та експериментальні дослідження пар тертя гальм у стендових умовах під навантаженням у різних полях фрикційної взаємодії, що супроводжуються змінними експлуатаційними параметрами дозволили отримати наступне. Показати, що основним параметром в тепловій динаміці є динамічний коефіцієнт тертя, який є комплексним експлуатаційним параметром більшості розрахункових залежностей зі своїми флуктуаційними властивостями. Встановити фактори, якими можна задатися, а ряд факторів віднесені до важко керованих і тому для розрахунків необхідно оперувати значеннями інтервалів їх зміни, з яких використовувати середні величини. Проілюструвати безрозмірні закономірності зміни швидкості ковзання, гальмівного моменту і потужності тертя для різних типів пар тертя гальм, а для останніх вище названих розмірних параметрів від часу гальмування для дисково-колодочного гальма для транспортного засобу в лабораторних умовах. Оцінити закономірність зміни динамічного коефіцієнта вузла «ФК-24 – сталь 35ХНЛ» при фрикційній взаємодії від впливу механічного, електричного, теплового та хімічного полів.

Ключові слова: гальмівні пристрої, пари тертя, тепла динаміка, фрикційні матеріали, експлуатаційні параметри.

Вступ. Аналіз робіт у галузі експлуатації та дослідження важконавантажених гальмівних пристроїв показує, що на фрикційні характеристики впливає головним чином тепла динаміка тертя. Інтенсифікація режимів експлуатації навантажених гальмівних пристроїв і пов'язане з цим збільшення інтенсивності нагрівання робочих елементів викликає необхідність попередньої, на стадії розробки конструкції, оцінки температурного режиму роботи з метою правильного підбору пар тертя матеріалів і забезпечення надійних фрикційно-зносних характеристик. Слід зазначити, що останнім часом намітилася чітка тенденція до комплексних теплових розрахунків фрикційних гальмівних пристроїв на стадії розробки.

Аналіз літературних джерел та стан проблеми. У роботах [1, 2, 3] вибір конструктивних параметрів фрикційних елементів (площі тертя, товщини) проводиться, виходячи з допустимої поверхнево-об'ємної температури нагрівання фрикційних матеріалів накладки. При цьому обсяг матеріалів елементів тертя повинен забезпечити поглинання теплоти, що виділилася при їх фрикційній взаємодії. В іншому випадку відбудеться деструкція зв'язуючого компонента з робочої поверхні фрикційної накладки, що позначиться на ефективності гальма.

Досить повно з урахуванням взаємозалежності процесів, що протікають під час тертя, розглянуто питання комплексної оцінки теплового режиму фрикційних гальмівних пристроїв у серії робіт дослідження фрикційних

властивостей матеріалів ІМАШ [1, 4]. Слід зазначити, що оцінка температурних умов роботи фрикційних вузлів, і зокрема, температури на контакті є дуже складною проблемою як з погляду процесів, що відбуваються на контакті, так і методологічному аспекті.

У зв'язку з дискретністю мікроконтактування твердих тіл в даний час широкого поширення набули уявлення про підвищення температури на фрикційному контакті як двостадійний процес, що включає: а) загальний підйом температури, що впливає на поверхню тертя в цілому, який можна представити як деяку усереднену поверхневу (або підповерхневу) температуру ϑ^* , і б) локалізовані температурні спалахи на фактичних плямах контакту $\vartheta_{\text{сп}}$, які накладаються на середню поверхневу температуру та у сумі дають максимальну (загальну) температуру поверхні ϑ_{max} [4, 5].

Цікаві дослідження проведені в роботах [5 - 8], що стосуються термостабілізаційного стану металевого фрикційного елемента та деструкційного стану поверхневих та підповерхневих шарів фрикційних накладок різних матеріалів. Два стани є взаємопов'язані і впливають на триваючі у них процеси.

Однак у всіх роботах не було приділено увагу динамічному коефіцієнту пар тертя, виходячи з теплової динаміки.

Вплив динамічного коефіцієнта тертя на експлуатаційні параметри гальма. Швидкість ковзання на контакті мікровиступів пар тертя та імпульсні питомі навантаження є факторами, якими можна задатися, а фактори в процесі гальмування – коефіцієнти теплообміну із зовнішнім середовищем, розподіл теплових потоків, динамічний взаємного перекриття локальних ділянок пар тертя та динамічний тертя відносяться до важкокерованих. Це пов'язано з тим, що при високошвидкісних процесах тертя вони є змінними і швидко змінюються. Тому для зазначених вище експлуатаційних параметрів для різних матеріалів пар тертя рекомендується задавати інтервал як зміни, і в ньому оперувати середнім значенням для розрахунків.

Відповідно до теплової динаміки поверхнева температура спалаху t_b залежить від середньої поверхнево-об'ємної температури t_c . Цей взаємозв'язок простежується через зміни діаметрів площ плям контактів та їх величини площ, які для пластичного контакту залежать від стану матеріалу фрикційної накладки, тобто її твердості $[HB_2(t_2)]$.

Визначення середньої потужності гальмування виражається залежністю:

$$W_{cp} = \int_0^{t_x} F \cdot v \cdot dt . \quad (1)$$

У підінтегральному вираженні формули (1) добуток $F \cdot v$ є поточною потужністю тертя:

$$N = F \cdot v. \quad (2)$$

Розглянемо можливі варіанти залежності середньої потужності тертя від часу, виходячи з міркувань. Нехай є задана величина середньої потужності гальмування:

$$W_{cp} = \text{const}, \quad (3)$$

яка має бути здійснена парами тертя гальма за фіксований час $t_T = \text{const}$. Ці умови говорять про те, що середня потужність тертя має бути постійною величиною:

$$N_{cp} = \text{const}. \quad (4)$$

Як було зазначено вище, динамічний коефіцієнт тертя фрикційної пари гальма залежить від визначальних факторів: режим роботи; властивостей фрикційної пари; топографії мікровиступів пари тертя. Вплив цих факторів на динамічний коефіцієнт та знос відбувається через енергонавантаженисть фрикційної взаємодії. Досвід застосування сучасних фрикційних матеріалів, що відрізняються високою фрикційною теплостійкістю, показує, що для різних марок матеріалів динамічний коефіцієнт тертя залежить від поверхнево-об'ємної температури тертя так, як показано на рис. 1. Металопластмаса забезпечує достатню сталість динамічного коефіцієнта тертя, і тому:

$$f_1 = \text{const}. \quad (5)$$

Для теплостійких фрикційних пластмас із зростанням температури відбувається невелике лінійне зниження динамічного коефіцієнта тертя:

$$f_2 = b_2 - k_2\vartheta. \quad (6)$$

Для важконавантажених пар тертя гальма у спряженні з робочим фрикційним шаром від застосування ретинаксу ФК-24А записуємо:

$$f_2 \approx 0,45 - 0,0002\vartheta. \quad (7)$$

Для фрикційних спечених матеріалів характеру близька до показової функції залежність коефіцієнта тертя від температури:

$$f_3 = b_3 e^{-k_3\vartheta}, \quad (8)$$

яка для випадку ФМК-11 може бути записана:

$$f_3 \approx 0,7 e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \vartheta}. \quad (9)$$

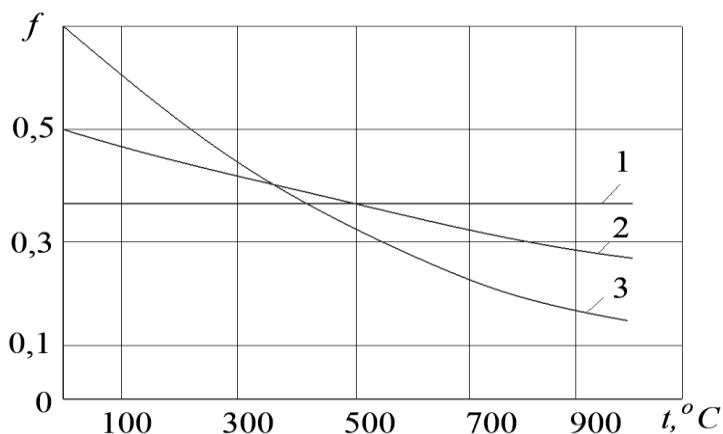


Рис. 1. Характеристика фрикційної теплостійкості сучасних матеріалів у парі з чавуном ЧНМХ для навантажених вузлів: 1 – металопластмаса; 2 – ретинакс ФК-24А, припрацьований; 3 – спечений матеріал ФМК – 11

На рис. 2 а, б наведена схема двох типів флуктуацій динамічного коефіцієнту тертя в режимі вибіркового перенесення при миттєвому додатку та зняття додаткового навантаження ΔF . Після зняття навантаження збільшений динамічний коефіцієнт тертя знижується, причому переходить через границю рівноважного стану (граничного циклу) і знову приходить до цієї границі.

Характеристики фрикційної теплостійкості показані на рис. 2, отримано на стаціонарних режимах.

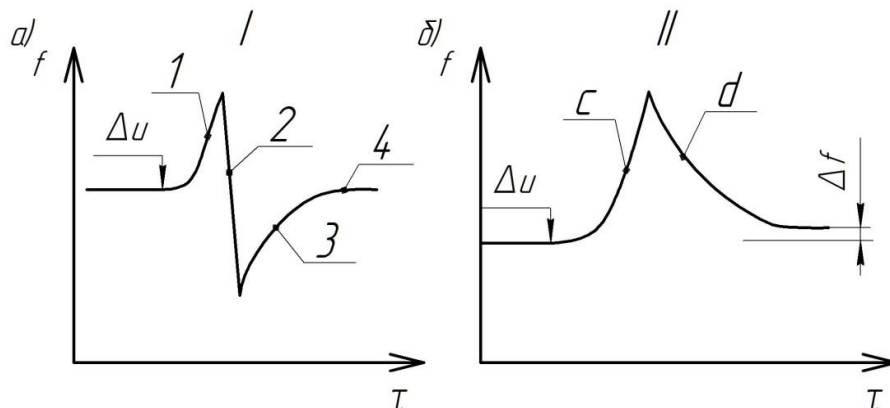


Рис. 2 а, б. Закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя f (флуктуація) за часом τ при миттєвому навантаженні та знятті навантаження: *I* – на неспадній гілці: 1 – зміцнення та десорбція; 2 – вибіркового знос та розміцнення; 3 – відновлення рівноважної концентрації вакансій; 4 – режим, що встановився; *II* – на висхідній гілці: *c* – зміцнення та десорбція; *d* – релаксація та адсорбція; Δu , Δf – зміна: енергії процесу; динамічного коефіцієнта тертя

Вирази (8-9) дозволяють отримати у парі пар тертя різні залежності сили тертя (моменту тертя) від часу. На нестационарних режимах інтенсивність теплового потоку, пропорційна потужності тертя $\Delta u_t = f_t \cdot p_t \cdot v_t \cdot A_k$, може мати характер, що значно відрізняється від лінійного (рис. 3). Як показують експериментальні дослідження, залежно від характеру зміни динамічного коефіцієнту тертя та навантаженості в процесі гальмування потужність тертя може мати різний характер зміни у часі. Якщо відомо зміну потужності тертя або гальмівного моменту часу, то повна робота гальмування може бути отримана інтегруванням зазначених залежностей за часом.

Поведінка мікроступів пар тертя при фрикційному взаємодії. В якості прикладу проведемо оцінку енергонавантаженості локального контакту мікроступів металополімерних пар тертя трибо систем при поверхневій температурі нижче допустимої для матеріалів фрикційної накладки.

Стан міжконтактного середовища. При електротермомеханічному терті мікроступів 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 впливом зростаючих імпульсних питомих навантажень відбувається активна деформація мікроступів, тобто поверхневих шарів полімерних накладок та зміцнення плям контактів металевого фрикційного елемента. На цій

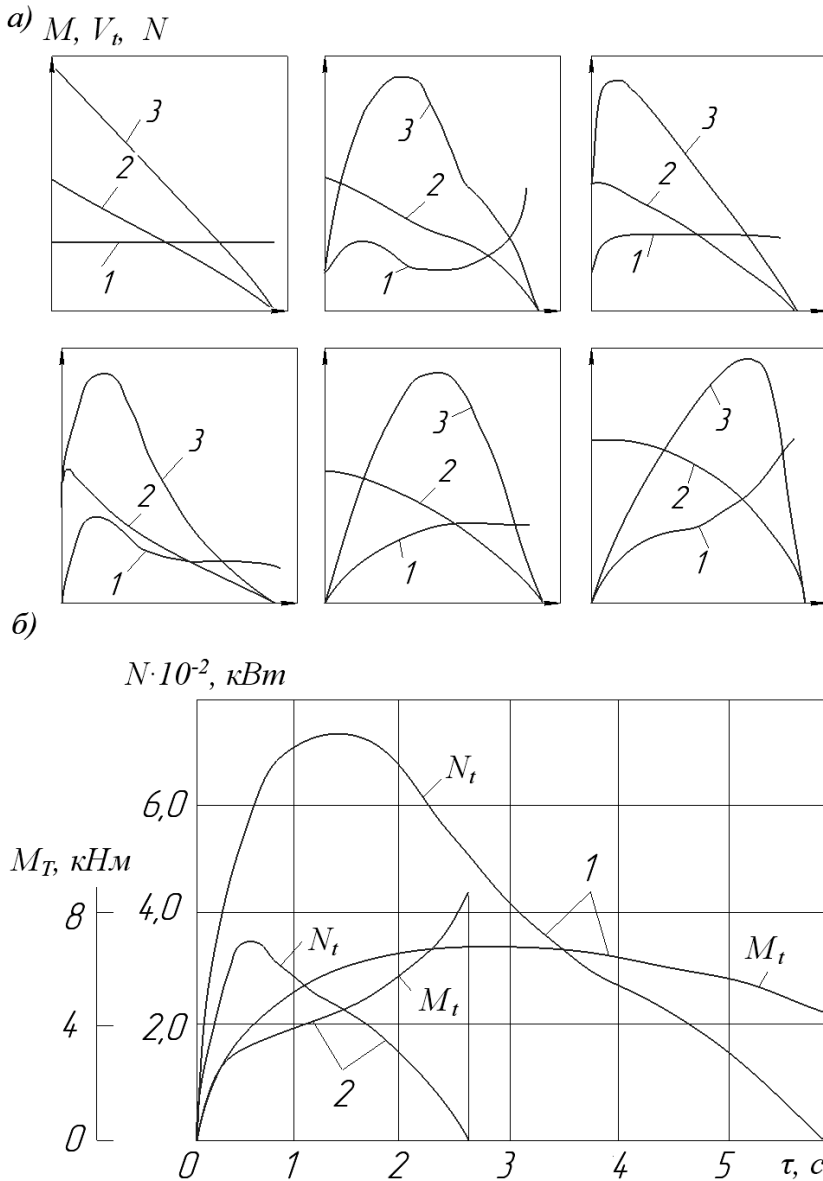


Рис. 3. Закономірності зміни: а – гальмівного моменту (1); швидкості ковзання (2) та потужності тертя (3); б – гальмівного моменту та потужності тертя у часі гальмування дисково-колодкового гальма в лабораторних умовах

стадії відбувається підготовка поверхневих шарів до утворення достатньої кількості активних центрів, що визначають їх розвиток внаслідок повзучості металу плям контактів мікровиступів. При цьому має місце інжектуєчий контакт. При підвищенні температури плям контактів мікровиступів металополімерних пар тертя трибоспряження від 100 до 200 ° С спостерігається коливання динамічного коефіцієнта тертя (від 0,39 до 0,42) [див. рис. 4]. При цьому електричні поля у трибоспряженні слабшають, а теплові поля – посилюються. Характеристика фрикційної теплостійкості на цій ділянці визначається переважно пружнопластичними властивостями матеріалу (перехід

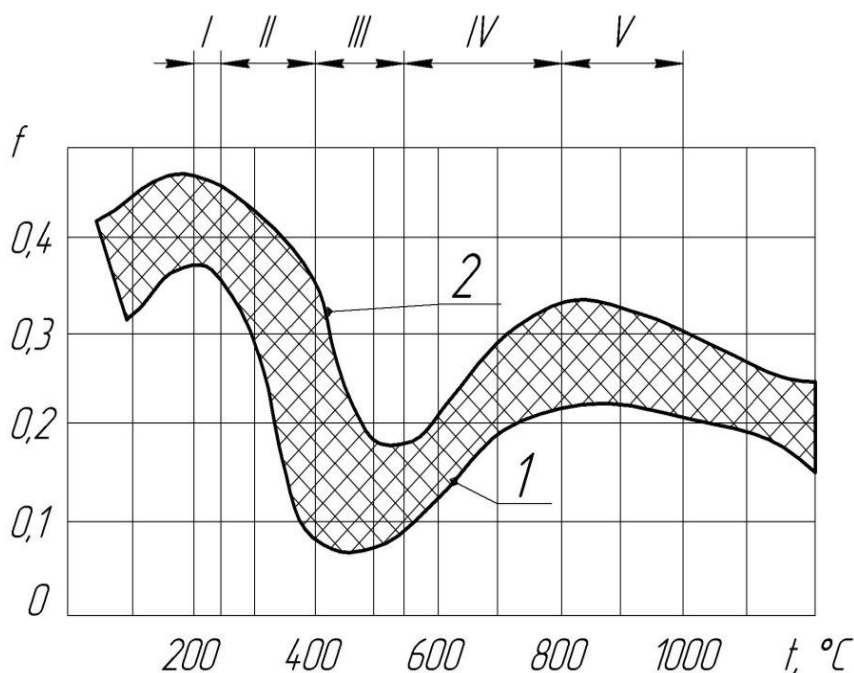


Рис. 4. Еталонна зміна коефіцієнта тертя матеріалу «Ретинакс» ФК-24А у функції температури поверхні тертя по зонах: I – 200...250 °С; II – 250...400 °С; III – 400...550 °С; IV – 550...800 °С; V – 800...1000 °С

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 полімерних матеріалів. Мікроконтакти з енергетичних характеристик наближаються до нейтральних.

Кількість повітря, що надходить на ділянки плям контактів мікровиступів кисню визначає інтенсивність термоокислювальних деструкційних процесів. Омиваюче повітря є окислювальним середовищем, що сприяє розвитку адсорбційного та щілинного ефектів у трибо спрженні.

Наявність подвійних електричних шарів. Виникає подвійний електричний шар, що охоплює виступи та западини мікронерівностей металевго 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.

Циркуляція струмів. Струм електризації напрямлений від плям контактів мікровиступів полімерної накладки до плям контактів мікровиступів металевго фрикційного елемента тертя. Генерована електрична енергія перетворюється на теплову енергію і нагріває тіло металевго фрикційного елемента і поверхневі шари полімерних накладок. Мікровиступи пар тертя омиваються повітрям навколишнього середовища.

Аналогічно проведемо таку ж оцінку при досягненні допустимої

температури матеріалами полімерної накладки.

Стан міжконтактного середовища. Електротермомеханічне тертя протікає при підвищених та знижених імпульсних питомих навантаженнях на плямах контактів мікроступів трибоспряження. При цьому проявляються закони неустановленої повзучості, в умовах постійної зміни (зазвичай зменшення) термонапружень у поверхневому шарі металевго елемента тертя (див. рис. 4., стадія III). На ділянці від 450 до 600 °С підвищення коефіцієнта тертя пояснюється утворенням коксоподібних продуктів деструкції зв'язуючого, що зумовлює формування робочого шару. Останній сприяє виникненню блокуючих контактів мікроступів трибоспряження. При температурах (600 ... 800) °С і вище динамічний коефіцієнт тертя стабілізується і досягає значення 0,32 (див. рис. 4). Інтенсифікуються деполаризаційні процеси на плямах контактів мікроступів трибоспряження. Азот та вуглекислий газ є нейтральними середовищами, в яких адсорбційний та щільний ефекти вироджуються. При цьому спостерігається збільшення H_2 до 0,171% у масових частках та поява CO (0,43% у масових частках).

Наявність подвійних електричних шарів. Виникає та розвивається сильний подвійний електричний шар у приповерхневих шарах полімерних накладок та слабкий подвійний електричний шар на мікроступах металевго елемента тертя через їх нагрівання. Приповерхневий шар накладки виконує функції термоелектрогенера, а мікроступи металевго елемента тертя – термоелектрохолодильника.

Циркуляція струмів. Переважає інверсія електричних струмів від плям контакту мікроступів металевго 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 подвійного електричного шару на робочій поверхні накладки. Мікроступи пар тертя омиваються повітрям навколишнього середовища та компонентами деструкційних процесів, що відбуваються в приповерхневих шарах накладки.

Що стосується оцінки енергонавантаженості локального контакту мікроступов металополімерних пар тертя трибо систем при перевищенні допустимої температури матеріалом полімерної накладки, то варто зазначити наступне.

Стан міжконтактного середовища. Електротермомеханічне тертя плям контактів мікроступів трибоспряження обумовлено повзучістю поверхневих шарів пари тертя «полімер-метал». Зі зростанням температури процес розвитку фізичного контакту інтенсифікується і може переходити на інші енергетичні рівні, змінюючи цим тип контакту. Фізичний контакт омичного типу здатний викликати процеси релаксації внутрішніх термонапружень у поверхневому шарі металевго елемента тертя за рахунок поверхневого пластичного тертя (див. рис. 4, стадія II). Коефіцієнт тертя стабілізується та має мінімальне значення (0,18) (див. рис. 4); дана зона є областю депресії через протікаючих у ній деполаризаційних процесів. У цій зоні фрикційні характеристики цілком визначаються змащувальною дією рідких продуктів деструкції зв'язуючого компонента (смоли). Спостерігається різке зменшення вмісту CO_2 до 0,13% у масових частках та поява H_2 (0,13% у масових частках) [див. табл. 1].

Таблиця 1

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

Номер проби	Фрикційний матеріал	Температура, °C	Вміст газу, мас. частка, %						
			H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	ΣC _n H _m	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 із чотирьох зон (точок) одночасно.

*** Під іншими газами мається на увазі: Ar, Ne, He, Kr, N₂O, Xe, O₂, Rn

Наявність подвійних електричних шарів. Є сильний подвійний електричний шар, сформований у приповерхневому шарі полімерних накладок. Подвійний електричний шар біля робочої поверхні металевго елемента тертя - слабкий елемент. При цьому металевий елемент тертя виконує функції термоелектрогенератора, а приповерхневі шари накладок – термоелектроохолодильників.

Циркуляція струмів. Переважає інверсія електричних струмів від робочих поверхонь полімерних накладок робочу поверхню металевго елемента тертя (зворотний струм). У той же час спостерігаються слабкі прямі струми. Циркулюючі теплові струми в елементах фрикційного вузла сприяють термостабілізаційному стану обода. Мікровиступи трибоспряження омиваються компонентами вигорілих речовин з поверхневих та приповерхневих шарів полімерних накладок.

На цьому моделювання процесів, що викликаються тертям у трибосистемі, яку необхідно враховувати при моделюванні процесів, які викликаються в них тертям, завершується.

Таким чином, фрикційні вузли гальмівних пристроїв на стадіях гальмування при контактній-імпульсній взаємодії супроводжуються складними динамічними, електричними та тепловими ефектами, які включають: електродинамічні та термодинамічні процеси, поляризаційні та деполіаризаційні процеси поверхонь, триботехнічними процесами взаємодії матеріалів, а також теплообміну та зносу.

Результати та обговорення. Теоретичні та експериментальні дослідження пар тертя гальм у стендових умовах під навантаженням у різних полях фрикційної взаємодії, що супроводжуються експлуатаційними параметрами, які змінюються, дозволили отримати таке:

- показати, що основним параметром теплової динаміки є динамічний коефіцієнт тертя, який є комплексним експлуатаційним параметром більшості розрахункових залежностей зі своїми флюктуаційними властивостями;

- встановити фактори, якими можна задатись, а ряд факторів віднесені до важко керованих і тому для розрахунків необхідно оперувати значеннями інтервалів їх зміни, з яких використовувати середні величини;

- проілюструвати безрозмірні закономірності зміни швидкості ковзання, гальмівного моменту і потужності тертя для різних типів пар тертя гальм, а для останніх вище названих розмірних параметрів від часу гальмування для дисково-колодкового гальма для транспортного засобу в лабораторних умовах;

- оцінити закономірність зміни динамічного коефіцієнта вузла «ФК-24 – сталь 35ХНЛ» при фрикційній взаємодії від впливу механічного, електричного, теплового та хімічного полів.

Висновки. Таким чином, встановлено вплив: динамічного коефіцієнта тертя, як комплексного параметра, при фрикційній взаємодії мікровиступів пар тертя гальм та на їх експлуатаційні характеристики.

Список літератури

1. Довідник з трибології: у 3-х т. // За заг. ред. М. Хебти, А. В. Чичінадзе. - Т. 1 - Теоретичні основи. - М.: Машинобудування, 1989. - 400 с.
2. Джанахмедов А. Х. Фізико-стохастичне моделювання / А. Х. Джанахмедов. - Баку: Елм, 1988. - 152 с.
3. Горячева І. Г. Механіка фрикційної взаємодії / І. Г. Горячева. - М.: Наука, 2001. - 475 с.
4. Ігнат'єва З. В. До питання оцінки температури поверхні при терті зі значним тепловиділенням / З. В. Ігнат'єва, М. А. Махмедов. - У сб.: Завдання нестационарного тертя в машинах, приладах та апаратах // М.: з-за «Наука», 1978. - 247 с.
5. Дискові та дисково-колодкові гальма в машинобудуванні / А. Х. Джанахмедов, Д.А. Вовченко, Н.А. Вольченко, В.С. Скрипник [та ін] // Баку: «Apostrof-A». У 3-х томах. Том 1, 2020. - 376с.
6. Дискові та дисково-колодкові гальма в машинобудуванні / А. Х. Джанахмедов, Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко [та ін.] Том 2. Баку: "APOSTROF-A", 2021. - 392с.
7. Закономірності зміни характеристик процесів, явищ та ефектів та робочих шарах металополімерних пар при електротермомеханічному терті / А. М. Пашаєв, А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко [та ін.] // Вісник Азербайджанської інженерної академії. – Баку. - 2014. - №6 (1). - С. 7 - 24.
8. Volchenko, N.; Volchenko, A.; Volchenko D.; Поляков, Р.; Мalyk, V.; Журавлев, Д.; Витвицкий, V.; Krasin, P. Features of the Estimation JF the Intensity of Heat Exchange in Self – Ventilated Disk – Shoe Brakes of Vehicles. East. Eur. J. Enterp. Technol. 2019, 1, 47 – 53.

Возний Андрій Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019; докторант кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, E-mail: andrii.voznyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>.

Вудвуд Олександр Миколайович - канд. техн. наук, доцент, зав. кафедри підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, пр. Шевченка, 1, моб. 096-639-02-02, Email: alex.vudvud@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4807-36314>.

Voznyi Andrii Volodymyrovych – candidate of technical sciences, associate professor of the department of information and telecommunication technology and systems, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska str. 15, Ivano-Frankivsk, 76019; doctoral student of the department of construction and road machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, Yaroslav Mudryi str., 25, Kharkiv, 61002, E-mail: andrii.voznyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>.

Vudvud Oleksandr Mykolayovych – candidate of technical sciences, associate professor, head Department of Lifting, Transport and Robotic Equipment, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine, 1 Shevchenko Ave., mob. 096-639-02-02, Email: alex.vudvud@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4807-36314>.

A. V. VOZNYI, O. M. VUDVUD

THEMAL DYNAMICS OF BRAKE DEVICES

Theoretical and experimental studies of brake friction pairs under bench conditions under load in different fields of frictional interaction, accompanied by variable operating parameters, made it possible to obtain the following. Show that the main parameter in thermal dynamics is the dynamic coefficient of friction, which is a complex operational parameter of most calculated dependencies with its fluctuating properties. Set the factors that can be set, and a number of factors are classified as difficult to control, and therefore for calculations it is necessary to operate with the values of the intervals of their change, from which to use the average values. To illustrate the dimensionless regularities of changes in sliding speed, braking torque and friction power for different types of brake friction pairs, and for the latter dimensional parameters from the braking time for a disc-pad brake for a vehicle in laboratory conditions. To evaluate the regularity of changes in the dynamic coefficient of the assembly "FK-24 - steel 35KHNL" during frictional interaction under the influence of mechanical, electrical, thermal and chemical fields.

Key words: braking devices, friction pairs, thermal dynamics, friction materials, operating parameters.

References

1. Dovidnyk z trybolohiyi: u 3-kh t. // Za zah. red. M. Khebty, A. V. Chychinadze. - T. 1 - Teoretychni osnovy. - M.: Mashynobuduvannya, 1989. - 400 s.
2. Dzhanakmedov A. Kh. Fyzyko-stokhastychnye modelyuvannya / A. KH. Dzhanakmedov. - Baku: Elm, 1988. - 152 s.
3. Horyacheva I. H. Mekhanika fryktsiyanoi vzayemodiyi / I. H. Horyachova. - M.: Nauka, 2001. - 475 s.
4. Ihnat'yeva Z. V. Do pytannya otsinky temperatury poverkhni pry terti zi znachnym teplovydilennyam / Z. V. Ihnat'yeva, M. A. Makhmedov. - U sb.: Zavdannya nestatsionarnoho tertya v mashynakh, prykladakh ta aparatakh // M.: z-za «Nauka», 1978. - 247 s.
5. Dyskovi ta dyskovo-kolodkovi hal'ma v mashynobuduvanni / A. Kh. Dzhanakmedov, D. A. Vovchenko, N.A. Vol'chenko, V.S. Skrypnyk [ta in] // Baku: «Apostrof-A». U 3-kh tomakh. Tom 1, 2020. - 376s.
6. Dyskovi ta dyskovo-kolodkovi hal'ma v mashynobuduvanni / A. Kh. Dzhanakmedov, D.A. Vol'chenko, N.A. Vol'chenko [ta in.] Tom 2. Baku: "APOSTROF-A", 2021. – 392 s.
7. Zakonomirnosti zminy kharakterystyk protsesiv, yavlyshch ta effektiv ta robochykh sharakh metalopolimernykh par pry elektrotermomekhanichnomu tertu / A. M. Pashayev, A. KH. Dzhanakmedov, D. A. Vol'chenko [ta in.] // Visnyk Azerbaydzhans'koyi inzhenernoyi akademiyi. – Baku. - 2014. - №6 (1). - S. 7 - 24.
8. Volchenko, N.; Volchenko, A.; Volchenko D.; Polyakov, P.; Malyk, V.; Zhuravlev, D.; Vytvytskyi, V.; Krasin, P. Features of the Estimation of the Intensity of Heat Exchange in Self-Ventilated Disk-Shoe Brakes of Vehicles. East. Eur. J. Enterp. Technol. 2019, 1, 47 – 53.