

УДК 621. 891

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНОШУВАННЯ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ ЗА ВПЛИВУ ТРИБОСТРУМІВ

*С. І. КРИШТОПА, І. Б. ПРУНЬКО, Б. В. ДОЛІШНІЙ,
М. В. ПАНЧУК, І. М. БОГАТЧУК, В. М. МЕЛЬНИК*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

На основі досліджень трибологічних характеристик металополімерних пар тертя гальмівних механізмів у виробничих та лабораторних умовах встановлено закономірності зміни: циркулюючих трибострумів у парах тертя сірий чавун–полімери барабанно- та стрічково-колодкових гальм від температури на поверхні фрикційних вузлів та кількості циклів гальмувань; динамічного коефіцієнта тертя від циркулюючих трибострумів; лінійного зносу пар тертя гальмівних пристроїв від генерованих трибострумів у зоні контакту двошарових структур метал–полімер.

Ключові слова: *металополімерні пари тертя, барабанно- і стрічково-колодкові гальма, дискове гальмо, трибологічні характеристики, трибоелектричні явища.*

Вступ. Особливості трибоелектричних явищ, які супроводжують зношування різних пар тертя за різних технологічних умов їх експлуатації, давно привертають увагу дослідників. Зокрема, це стосується подвійних електрополів у зонах контакту трибопар за присутності мастил [1, 2]. З'ясовано, що використання засобів зниження трибострумів дає змогу вдвічі підвищити зносотривкість композитних матеріалів [3]. Проаналізовані основні причини виникнення трибоелектричних струмів під час сухого тертя у фрикційних сталевих парах [4, 5]. Розраховано електричну провідність з урахуванням фактичної площі контакту шорстких трибоповерхонь [6]. Виявлені закономірності зношування металів у рідинних середовищах з урахуванням електрохімічних явищ, що супроводжують тертя [7–9]. З'ясовано [10], що попри невисоку провідність чистих полімерів, вона різко зростає за забруднень, продуктів деструкції та дисоціації в зоні трибоконтакту. Механізм циркуляції електричних струмів через контакт пар метал–полімер та полімер–полімер пояснили потоком електронів від матеріалу із нижчою до матеріалу з вищою роботою виходу електронів. Зокрема, за роботою виходу електронів запропоновано оцінювати стан та дефекти поверхонь тертя, а також визначати рівень поверхневої енергії [11]. Встановлено, що електропровідність полімерів збільшується на два порядки за присутності в них сполук міді, на декілька порядків за сорбції води полімером та за перевищення температури плавлення [12]. Трибоелектричні явища в металополімерних парах тертя істотно впливають на масоперенос металів на поверхню полімеру і утворення полімерних плівок на поверхні металів, що визначає значення трибоелектричного струму та його спрямованість [13]. Але щодо механізму виникнення електрорушійної сили між елементами трибопари існує лише припущення. Так, за впливу наводнювання на тертя та напрями циркуляції трибострумів між металополімерними парами стрічково-колодкових гальм зростає знос поверхонь тертя та знижується ефективність гальмування [14]. Проте теоретичні розрахунки не завжди узгоджуються з експериментальними результатами [12–14].

Мета роботи – встановити закономірності зміни характеристик зносу поверхневих шарів металополімерних пар тертя за впливу електричної, механічної та теплової взаємодії у фрикційних вузлах гальмівних механізмів з урахуванням трибоелектричних процесів.

Методики досліджень. Трибоелектричні явища досліджували експериментально на спеціально створених лабораторних стендах, на яких моделювали стрічково-, барабанно- та дисково-колодкове гальмування та на серійному універсальному автомобільному гальмівному стенді моделі КИ-8964 ГОСНИТИ. Гальмівні стенди дали можливість: збільшити тривалість гальмування для замірів струмів та температури на поверхнях металополімерних пар тертя; моделювати реальні умови роботи пар тертя під час гальмування з можливістю змінювати трибологічні параметри їх поверхневих шарів. Під час випроб реєстрували такі параметри: час t та кількість гальмувань m ; температуру T та кутові швидкості фрикційних елементів ω ; натяги висхідної S_{asc} і низхідної S_{dsc} ділянок гальмівної стрічки; знос поверхонь тертя δ гальмівних накладок n , які послідовно розташовували на гальмівній стрічці від її низхідної до висхідної гілок; трибоструми I між парами тертя і їх спрямованість; різниці потенціалів U між фрикційними парами. Для дослідження фрикційних вузлів, які експлуатуються в барабанно- та дисково-колодкових гальмах, використали діагностичний стенд гальмівної системи КИ-8964, який дав змогу заміряти гальмівне зусилля F_{BR} . Трибоелектричні струми вимірювали в режимі реального часу наноамперметром Ф-195, а різницю потенціалів у парах тертя – аналого-цифровим перетворювачем USB Oscilloscope II з використанням відповідного програмного забезпечення. Кількість експериментів забезпечувала довірчу ймовірність одержаних результатів 0,95.

Результати досліджень. Експериментально встановили, що контактна різниця потенціалів містить сталу та імпульсну складові. Перша переважно залежить від матеріалу контактуючих поверхонь та поверхневих температур, а друга – від флуктуацій електротермічного опору під час контакту та коливань енергії поверхонь тертя. Імпульсна складова контактної різниці потенціалів сильніше впливає на зносотривкість пар тертя, ніж стала.

Трибологічні матеріали проводять електричний струм завдяки можливості зарядів (електрони, іони) пересуватися в них. Густина струму j для металевго фрикційного елемента описує формула Річардсона–Дешмана:

$$j = CT^2 e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (1)$$

де T – температура поверхні металевго фрикційного елемента; C – стала, залежна від властивостей матеріалу та поверхні; k – стала Больцмана; W – робота виходу електронів з металу за даної температури. Логарифмуванням формули (1) отримали:

$$\ln j/T^2 = \ln C - \frac{W}{kT} \ln e. \quad (2)$$

З різниці між такими виразами для температур T_1 і T_2 для металевго фрикційного елемента перед і після гальмування, врахувавши, що $j = I/A$ (де I – змінний струм, який циркулює через ділянку площею A між елементами пари тертя), визначили роботу виходу електронів з металевго елемента після гальмування:

$$W_2 = W_1 - k \left(\ln \frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2} / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right). \quad (3)$$

На знос поверхонь тертя суттєво впливає контактна різниця потенціалів ϕ_k та поверхневих температур елементів трибопари T . Якщо один з елементів нагрі-

вається сильніше, то електрони або іони (як термострум) рухатимуться в напрямі до іншого елемента трибопари. А різниця потенціалів між ними зростатиме із збільшенням площі контакту між ними. Заряди матеріалів трибопари будуть при цьому однакові за значенням, але різні за знаком. Взаємодію поверхонь у парі тертя метал–полімер визначає тип контакту і його енергетичний рівень. Причому основною характеристикою енергетичного рівня того чи іншого контакту є робота виходу електронів з поверхневого шару металевого фракційного елемента W_M і іонів з поверхневого шару полімерної частини трибопари W_P (рис. 1).

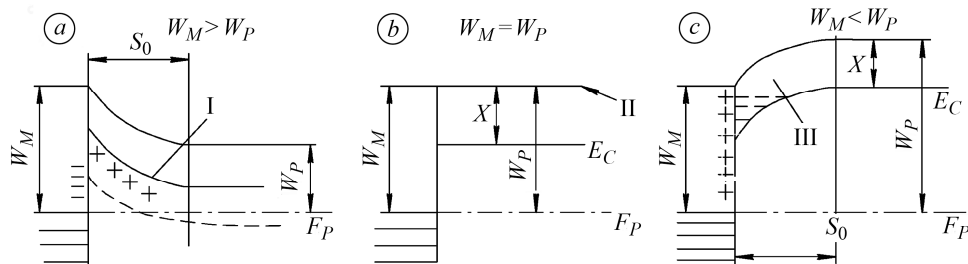


Рис. 1. Можливі варіанти роботи виходу електронів на поверхнях металу (W_M) і полімеру (W_P) в металополімерних трибопарах з інжекторним (а), нейтральним (б) та інжектованим (с) типами контактів у шарах завширшки S_0 , збагачених (б) і збіднених (с) на вміст електронів. F_P – рівень Фермі в полімері; X – енергія спорідненості до електрона; E_C – нижня межа зони провідності; I – незаповнені донори; II – вакуумний рівень; III – інжектовані електрони.

Fig. 1. Illustration of the possible options for the work of electrons on the metal (W_M) and polymer (W_P) surfaces in metal-polymer tribopairs with injection (a), neutral (b) and injected (c) contact types in the layers of S_0 width, enriched (b) and depleted (c) with the electron content.

F_P – Fermi level in a polymer; X – electron affinity energy; E_C – lower boundary of the conduction band; I – unfilled donors; II – vacuum level; III – injected electrons.

Фрикційні накладки гальм виготовлено з різнорідних матеріалів з кристалічною і аморфною структурою. Через їх різну провідність створюються передумови для накопичення зарядів з різним знаком на межах між ними. Внаслідок електризації матеріалу накладки відбуватиметься або відтік носіїв заряду від лінії розмежування з металевим елементом трибопари, або навпаки їх притік до неї (залежно від того, який з струмів провідності буде більшим – спрямований від межі чи до неї). За різницею енергетичних рівнів елементів трибопар виділяють такі типи контактної взаємодії між ними: нейтральний, інжекторний та інжектований (рис. 1). За інжекторних контактів у трибопарі носії заряду прямують до зарядженої поверхні полімерної накладки (відбувається їх інжекція) (рис. 1а). Циркуляції зарядів між металевими та полімерними фрикційними елементами за реалізації нейтральних контактів немає (рис. 1б), а за інжектованих – створюються передумови для прямування носіїв електричного заряду від зарядженої поверхні полімерної накладки до металевого фрикційного елемента (рис. 1с). Тип контакту визначає робота виходу електронів (або іонів) з поверхні металевого або полімерного фрикційного елемента. Якщо робота виходу зарядів з полімерного елемента менша, ніж з металевого, то відбуватиметься інжекторний трибоконтакт і поверхня металу заряджатиметься від’ємно (рис. 1а). Якщо ці роботи однакові, то реалізується нейтральний контакт (рис. 1б), а коли ж робота виходу електронів з полімерного елемента більша, ніж з металевого, то відбуватиметься інжективний контакт і поверхня металу заряджатиметься позитивно (рис. 1с).

Відзначили, що контактні плями на мікроставуках трибоповерхонь покриті плівками, які навіть за невисокої напруженості поля блокують їх електроконтакт. Через поверхню цих плям важче відбувається обмін носіями заряду від металевого-

го фрикційного елемента до полімерного і навпаки. У діелектриках без носіїв заряду протікання стаціонарного струму взагалі неможливе через такі блокувальні контакти. Якщо робота виходу з металевого елемента вища, ніж з полімерного ($W_M > W_P$), то за контакту металу з полімером електрони з полімеру переходять у метал, оскільки рівень Фермі в полімері перед фрикційною взаємодією з металом вищий, ніж у металі ($F_M > F_P$). При цьому метал отримує від'ємний, а полімер – додатний заряд. Спрямований потік електронів відбуватиметься аж до вирівнювання рівнів Фермі.

Циркуляція трибострумів у металополімерних парах тертя підвищує поверхневі температури та знос їх елементів, а нівелювання трибострумів дає змогу знизити і температуру, і знос поверхонь тертя. Тому для поліпшення експлуатаційних характеристик гальмівних механізмів серійні стрічково-, барабанно-, дисково-колодкові та удосконалені гальма атестували з використанням пристроїв деполіризації для зниження трибострумів у парах тертя. Для цього до металополімерних трибопар приєднували додатковий блок живлення, який вмикався за досягнення потенційного бар'єра. Якщо прикладена зовні до металополімерної пари напруга протилежна до контактної різниці потенціалів ("плюс" подавали на металевий фрикційний елемент), то потенційний бар'єр з боку полімерної накладки зменшувався, а трибоелектричний струм зростав (рис. 2а). Таке підключення назвали генерувальним. Якщо ж ця напруга збігалася з контактною різницею потенціалів (при цьому на металевий фрикційний елемент подавали "мінус"), то потенційний бар'єр з боку накладки зростав (рис. 2б), а трибоелектричний струм зменшувався. Таке підключення назвали блокувальним. Дослідження показали, що за генерувальної схеми підключення живлення ззовні температура та знос поверхонь пар тертя зростали, а за блокувальної – зменшувалися.

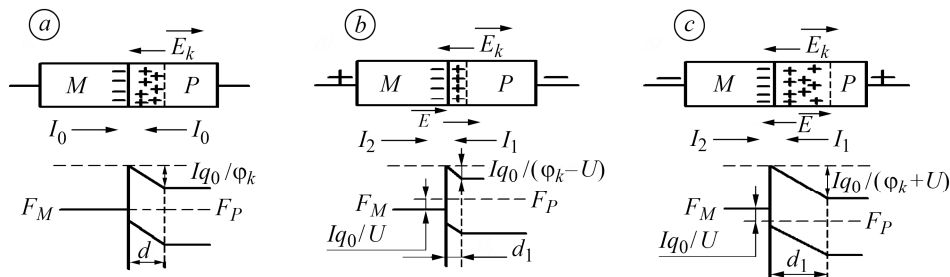


Рис. 2. Схеми енергетичних рівнів металополімерних гальмівних пар без (а) та за впливу пришвиджувального (б) та гальмівного (с) додаткового електричного поля. M і P – метал і полімер відповідно; F_M, F_P – рівень Фермі в металі та полімері відповідно; ϕ_k – контактна різниця потенціалів; Iq_0/ϕ_k – потенційний бар'єр, який виникає за контакту; U – прикладена зовнішня напруга; E – напруженість електричного поля; I – значення циркулюючих трибострумів; d – товщина поверхневого шару.

Fig. 2. Schemes of the energy levels created in the metal-polymer brake pairs without (a) and with the influence of accelerating (b) and braking (c) additional electric fields effects. M and P – metal and polymer, respectively; F_M, F_P – the Fermi level in the metal and polymer, respectively; ϕ_k – contact potential difference; Iq_0/ϕ_k – potential barrier arising under contact; U – applied external voltage; E – electric field strength; I – values of circulating tribocurrents; d – thickness of the surface layer.

Встановили закономірності зміни поверхневих температур T від кількості циклів гальмувань m , визначені для фрикційної пари сталь 35ХМЛ–ретинакс ФК-24А серійного та модернізованого стрічково-колодкового гальма, додатково обладнаного системою зниження трибострумів (рис. 3). Так, у модернізованому гальмі лебідки агрегату АОРС-80 максимальна поверхнева температура на робочій поверхні обода гальмівного шківів знизилася на 14,5%, а фрикційної накладки

– на 14,3% стосовно зафіксованих у серійному гальмі. Генерований при цьому в трибопарі струм у серійному гальмі становив 60 nA, а в обладнаному системою нівелювання трибострумів – 10 nA.

Рис. 3. Залежність температури T на поверхні елементів фрикційних гальмівних пар сталь 35ХМЛ–ретинакс ФК-24А у серійній (а) та в удосконаленій пристроєм нівелювання трибострумів (b) стрічково-колодкових гальмівних системах від кількості циклів гальмувань m та генерованих в серійному гальмі струмів $I = 10$ (1) та 60 nA (2).

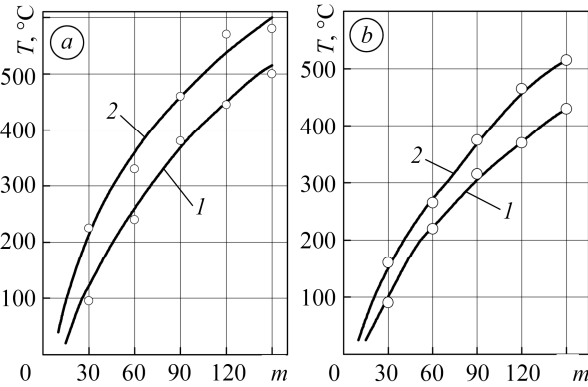


Fig. 3. Dependence of temperature T on the surface of the friction brake pair elements of 35CrMo casting steel–retinaks FK-24A in the serial braking tape-shoe type system (a) and in advanced one (b) with the system of neutralizing the tribocurrents effect versus the number of braking cycles m and currents $I = 10$ (1) and 60 nA (2) generated by the serial brake device.

Одними з основних експлуатаційних параметрів стрічково-колодкових гальм є натяги низхідної S_{dsc} і висхідної S_{asc} гілок гальмівної стрічки, різниця яких визначає силу тертя ($F_{fr} = S_{dsc} - S_{asc}$). При цьому один з натягів гальмівної стрічки задають, а інший – обчислюють. Переважно визначають натяг висхідної гілки стрічки за залежністю Ейлера:

$$S_{asc} = S_{dsc} e^{f\alpha}. \quad (4)$$

І тоді динамічний коефіцієнт тертя f визначають так:

$$f = \frac{S_{asc} - S_{dsc}}{F_{BR}} = \frac{F_{fr}}{F_{BR}}. \quad (5)$$

де α – кут охоплення стрічки.

За результатами дослідно-промислових випробувань отримали закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя f фрикційних пар сталь 34Л–ретинакс ФК-24А та сталь 60Г–азбестова композиція 6КФ-59 гальмівних пристроїв агрегатів УПА-60 та А2-32 від швидкості ковзання V залежно від генерованих струмів I (рис. 4).

Рис. 4. Залежність динамічного коефіцієнта тертя f фрикційних пар сталь 60Г–азбестова композиція 6КФ-59 (1, 2) та сталь 34ХМЛ–ретинакс ФК-24А (3, 4) у гальмівних пристроях від швидкості ковзання V та генерованих трибострумів $I = 70$ (1), 15 (2), 60 (3), 10 nA (4) з використанням пристрою деполаризації.

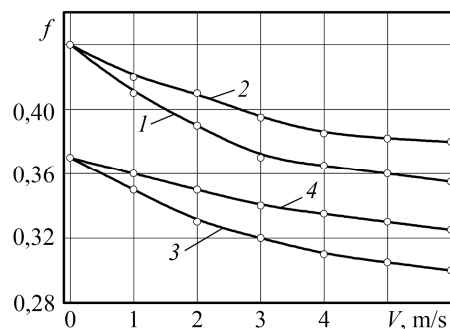


Fig. 4. Dependence of the dynamic friction coefficient f of friction pairs 60G steel-asbestos composition 6KF-59 (1, 2) and 34CrMo casting steel–retinaks FK-24A (3, 4) in braking devices on slip speed V and generated tribocurrent $I = 70$ (1), 15 (2), 60 (3), 10 nA (4) using a depolarization device.

Одним із основних експлуатаційних параметрів пар тертя є інтенсивність зношування їх поверхонь. Закономірності зміни лінійного зносу робочих поверхонь пар тертя сталь 34Л–ретинакс ФК-24А серійного та модернізованого (з пристроєм нівелювання трибострумів) типів стрічково-колодкових гальм підйомного агрегату для ремонту свердловин АПРС-50КАМ показали, що в середньому зношування накладок гальм удосконаленої конструкції на 20...30% менше, ніж гальм серійної конструкції (рис. 5).

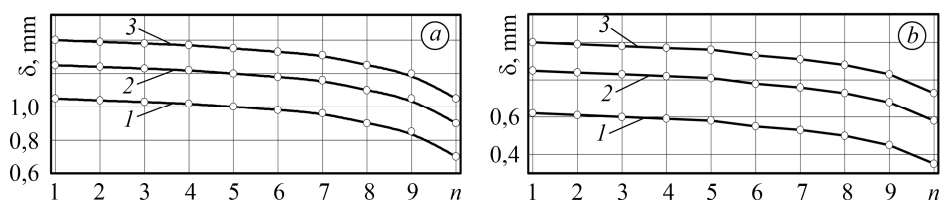


Рис. 5. Залежність лінійного зносу δ поверхонь накладок модельного стрічково-колодкового гальма від порядку розташування n на низхідній ділянці гальмівної стрічки за її натягу $S_{dsc} = 800$ (a) та 400 N (b) та генерованих трибострумів $I = 70$ (1, на серійному фрикційному вузлі), 50 (2) та 25 nA (3).

Fig. 5. Linear wear δ of the friction surfaces of overlays versus their location number n on the descending section of the brake band (in the model braking system of the tape-block type) under its tension $S_{dsc} = 800$ (a) and 400 N (b) and generated tribocurrents $I = 70$ (1, for serial friction device), 50 (2) and 25 nA (3).

За результатами досліджень встановили залежність електричного потенціалу контактуючих поверхонь від ємності металевго фрикційного елемента. Більшість конструкцій з металополімерними фрикційними вузлами заземляють (зокрема, бурові лебідки, залізничний транспорт тощо) або ізолюють від землі. При цьому вони мають досить велику метало-, а отже, і електричну ємність (авто-транспортні засоби). Для дослідження впливу ізоляції металевго фрикційного елемента на зношування поверхонь фрикційних накладок у лабораторних умовах передбачили неізольований (заземлений) стенд та шків ізольований від гальмівного барабана. За результатами випроб отримали закономірності зміни лінійного зношування поверхонь накладок модельного стрічково-колодкового гальма з ізольованим та неізольованим металевим елементом металополімерної трибопари сталь 34Л–ретинакс ФК-24А (рис. 6).

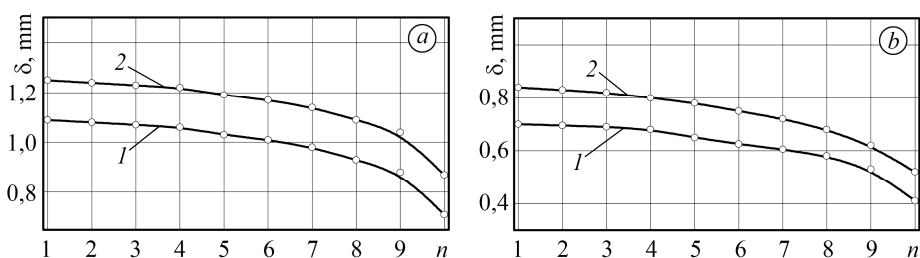


Рис. 6. Залежність лінійного зносу δ поверхонь накладок стрічково-колодкового гальма від порядку розташування n на низхідній ділянці гальмівної стрічки за її натягу $S_{dsc} = 800$ (a) і 400 N (b) для ізольованого гальмівного шківa (1) та серійного фрикційного вузла (2).

Fig. 6. Linear wear δ of the friction surfaces of overlays versus their location number n on the descending section of the brake band (in the braking systems of the tape-block type) under its tension $S_{dsc} = 800$ (a) and 400 N (b) for the insulated brake pulley (1) and the serial friction assembly (2).

Після 300 cycles навантаження оцінювали знос десятих накладок, розташованих вздовж низхідної ділянки натяжної стрічки залежно від її натягу: $S_{dsc} = 800$ (рис. 6a) та 400 N (рис. 6b). Встановили, що в середньому лінійний знос накладок стрічково-колодкового гальма з ізолюваним металевим фрикційним елементом на 15...20% менший, ніж накладок такого ж гальма серійної конструкції з неізолюваним. Щоб дослідити вплив ізоляції такого елемента на зношування поверхонь накладок автотранспортного засобу, здійснили дослідно-промислово апробацію агрегату АОРС-60 для освоєння та ремонту свердловин, обладнаного гальмівними барабанами виробництва КрАЗ. В одному із гальмівних механізмів барабан ізолювали від моста, а в іншому – залишили в серійному виконанні. Встановили, що в середньому лінійний знос поверхонь фрикційних накладок для удосконаленої конструкції стрічково-колодкового гальма зі системою нівелювання трибострумів та ізоляцією металевих фрикційних елементів на 30...40% менший, ніж поверхонь таких накладок у гальмах серійної конструкції.

Отримані експериментальні залежності для гальмівних металополімерних пар тертя можна пояснити з позицій зонної теорії, згідно з якою, контактна електризація трибоелементів спричиняє появу трибострумів між ними і, як наслідок, електроерозійне руйнування поверхонь, що пов'язане з переходом електронів у зоні тертя від елемента з меншою до елемента з більшою енергією виходу електронів. Зміна різниці між роботами виходу електрона з металу та полімеру (через зміну температури, натягів гальмівної стрічки) визначає циркулюючі між ними трибоструми. Зовнішнє електричне джерело дає змогу змінювати ефект трибоелектризації металополімерних пар тертя і зменшувати трибоструми та інтенсивність електроерозійних процесів на поверхнях тертя.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень впливу трибострумів на характеристики зношування металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв у лабораторних і виробничих умовах встановлено закономірності їх зміни: трибоструми, які виникають між поверхнями металополімерних пар тертя, залежать від тривалості їх фрикційної взаємодії та поверхневих температур елементів трибопари; гальмівні механізми, вдосконалені пристроєм нівелювання трибострумів у металополімерних парах тертя, знижують динамічний коефіцієнт тертя на 3...7% незалежно від швидкості обертання поверхонь тертя; нівелювання трибострумів та ізоляція елементів трибопари до 30% знижують знос поверхонь фрикційних накладок. Отримані результати можна використати для поліпшення експлуатаційних параметрів гальмівних пристроїв автомобільного транспорту та силових гальмівних механізмів відповідального призначення.

РЕЗЮМЕ. На основе исследований трибологических характеристик металлополимерных пар трения тормозных механизмов в производственных и лабораторных условиях установлены закономерности изменения: циркулирующих триботок в парах трения серый чугун–полимеры барабанно- и ленточно-колодочных тормозов от температуры на поверхности фрикционных узлов и количества циклов торможений; динамического коэффициента трения от циркулирующих триботок; линейного износа пар трения тормозных устройств от генерируемых триботок в зоне контакта двухслойных структур металл–полимер.

SUMMARY. Based on studies of the tribological characteristics of metal-polymer friction pairs of the brake mechanisms in production and laboratory conditions the following regularities of the change are established for: circulating tribocurrent in the friction pairs grey cast iron–polymers of drum-type and band-type brakes depending on the temperature on the friction units surface and the number of braking cycles; dynamic coefficient of friction depending on circulating tribocurrent; linear wear of friction pairs of brake devices depending on the generated tribocurrent in the contact zone of two-layer structures metal–polymer.

1. *Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions* / O. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, and R. Kostynik // Eastern European J. Enterprise Techn. – 2016. – **4**, № 1 (82). – P. 24–31.
2. *Ropyak L. and Ostarovych V. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts* // Eastern-European J. Enterprise Techn. – 2016. – **2**, № 5(80). – P. 50–62.
3. *Формирование структуры и свойства композиционных покрытий TiB₂-TiC-сталь, полученных совмещением электродуговой наплавки и СВС* / Д. Л. Луцак, П. М. Присяжнюк, М. О. Карпаш, В. М. Пылыпив, В. О. Коцюбинський // Металлофизика и новейшие технологии. – 2016. – **38**, № 9. – С. 1265–1278.
4. *Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum* / A. Dykha, V. Aulin, O. Makovkin, and S. Posonskiy // Eastern-European J. Enterprise Techn. – 2017. – **3**, № 7(87). – P. 4–10.
5. *Ivschenko L. Y., Tsyganov V. V., and Adjerid S. Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance a l'usure des tribocontacts* // J. Matériaux & Techniques. – 2013. – № 4. – P. 75–76.
6. *Study on thermal strength reduction of rock formation in the diamond core of drilling process using pulse flushing mode* / A. Yu. Dreus, A. A. Kozhevnykov, A. K. Sudakov, and Yu. N. Vakhalin // Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 3. – С. 5–10.
7. *Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть вторая)* / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев, М. Я. Джавадов, А. В. Возный, П. С. Красин // Проблемы тертя та зношування. – 2014. – № 3 (64). – С. 4–16.
8. *Трибологічні властивості комбінованих метало-оксидокерамічних шарів на легких сплавах* / М. М. Студент, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків, В. М. Посувайло, В. В. Шмирко, А. Р. Киця // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 2. – С. 55–64.
(*Tribological properties of combined metal-oxide-ceramic layers on light alloys* / M. M. Student, V. M. Dovhnyk, M. D. Klavkiv, V. M. Posuvailo, V. V. Shmyrko, A. P. Kytsya // Materials Science. – 2012. – **48**, № 2. – P. 180–190.)
9. *Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe-Cr-C, Fe-Cr-B за корозивною тривкістю електродугових покривів* / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–28.
(*Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe-Cr-C and Fe-Cr-B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdets'kyi // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
10. *Examining the effect of triboelectric phenomena on wear-friction properties of metal-polymeric frictional couples* / S. Kryshtopa, L. Kryshtopa, I. Bogatchuk, I. Prunko, V. Melnyk // Eastern-European J. Enterprise Techn. – 2017. – **1**, № 5(85). – P. 40–45.
11. *Influence of triboelectric processes on friction characteristics of brake units of technological transport* / S. Kryshtopa, A. Kozhevnykov, M. Panchuk, and L. Kryshtopa // Науковий вісник НГУ. – 2018. – № 3. – P. 87–93.
12. *Вольченко О. І., Криштопа С. І., Карась В. І. Електродинамічні процеси та їхній вплив на знософрискційні властивості металополімерних пар тертя гальмівних приладів* // Зб. наук. пр. СевНТУ. – 2012. – Вип. 135. – С. 237–240.
13. *Band-block brake with conductive cooling* / A. K. Janahmadov, A. M. Aliev, A. I. Volchenko, and M. Y. Javadov // SRI researcher notes "Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry". – Baku, 2013. – P. 113–119.
14. *The multi-fractal analysis of fatigue failure under friction process* / A. M. Pashayev, A. K. Janahmadov, O. A. Dyshin, and M. Y. Javadov // J. Sci. and Appl. Eng. – 2013. – **1**. – P. 112–116.

Одержано 14.09.2018