

АНАЛІЗ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ І СТАН ТЕРТЬОВИХ ПОВЕРХОНЬ

Роїк Т.А., Гавриш А.П., Віцюк Ю.Ю., Мельник О.О., Холявко В.В.
(НТУУ «КПІ», м.Київ, Україна)

In this work, presented a new composite antifriction materials based on nickel alloy ЭИ929 with additives CaF_2 efficient solid lubricant for manufacturing effective bearings with low friction coefficient and wear. These materials were produced and investigated with respect to their surface status and antifriction material's tribotechnical properties. It is shown secondary films loading capacity depends on operation condition friction unit and rider's properties. It is established fact secondary films formation ensure minimum friction coefficient and wear intensity of bearing material and rider.

Головне прагнення науковців та практиків – у процесі створення будь-яких підшипникових матеріалів домагатися якомога нижчих значень коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування.

Якщо коефіцієнт тертя антифрикційних (підшипникових) матеріалів позначити через μ_i , то коефіцієнт корисної дії (ККД) вузла тертя становитиме [1]:

$$K_i = 1 - \mu_i$$

За наявності n вузлів тертя, що працюють послідовно, ККД машин визначається інтегралом [1]:

$$K_m = \int_0^n K_n.$$

Отже, прагнення до підвищення ККД машин нерозривно пов'язане зі зменшенням значення коефіцієнту тертя у кожному вузлі.

Зниження коефіцієнту тертя, зокрема, для підшипникових матеріалів високотемпературного призначення, у свою чергу, пов'язане з багатьма чинниками і залежить, насамперед, від типу утворених при роботі плівок тертя (вторинних структур) матеріалу підшипника і контртіла.

В роботі об'єктом досліджень було обрано антифрикційний композиційний жаростійкий матеріал на основі високолегованого нікелевого сплаву ЭИ 929 з домішками фториду кальцію CaF_2 та встановлено вплив параметрів режимів експлуатації (швидкості ковзання - V , навантаження - P) на працездатність вузла тертя при високих температурах (850°C) на повітрі.

На триботехнічні характеристики дуже впливають структурні складники, що формують металеву матрицю. Тому для створення вигідної з погляду трибології металографічної структури, забезпечення високої антифрикційності матеріалів застосовували деякі технологічні керовані заходи: матеріали одержували методом порошкової металургії, використовуючи технологію гарячого ізостатичного пресування, для зміцнення матеріалів проводили додаткову термічну обробку: гартування – 1240 °C та старіння при 900 °C на повітрі [2, 3]. Ці заходи дозволили сформувати та забезпечити наявність у композиційних матеріалах наперед заданих структурних складників та фаз, які сприяють зниженню коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування, а, отже, підвищенню ККД машин та механізмів.

У процесі тертя та зношування на поверхні і у приповерхневих шарах матеріалів залежно від умов тертя виникають і розвиваються механічні та фізико-хімічні процеси, які зумовлюють кількісні характеристики процесів тертя та зношування - коефіцієнт тертя - μ та інтенсивність зношування - I , а також зміну якісного стану поверхневих шарів матеріалів. За високих температур на повітрі, внаслідок значного прискорення адсорбційних і хімічних процесів на поверхні, особливого значення при терті набувають фізико-механічні властивості матеріалів, а також властивості поверхневих шарів, що формуються під впливом швидкостей ковзання, нормальних навантажень та температур.

Кількісні характеристики при терті (μ , I) тісно пов'язані з якісними характеристиками матеріалу, змінами властивостей контактуючих поверхонь (твердість, стан тонкої структури тощо). Одні зміни пояснюються явищами пластичного деформування, інші - явищами, пов'язаними з нагріванням та охолодженням, а треті - змінами складу поверхневих шарів, які відбуваються внаслідок їх взаємодії із середовищем, дифузії елементів всередину матеріалу за рахунок високих градієнтів температури або явищ перенесення.

У зв'язку з цим, при аналізі триботехнічних властивостей матеріалів і стану тертьових поверхонь, які є предметом дослідження, використовувався комплексний метод дослідження якісних та кількісних характеристик тертя та зношування, який дає змогу всебічно судити про ті процеси, котрі виникають і розвиваються на поверхнях тертя при високих температурах, що ілюструє актуальність дослідження.

Триботехнічні випробування проводили на високотемпературній машині тертя ВМТ-1 при температурі 850 °С на повітрі, швидкості ковзання 1-6 м/с, навантаженнях 0,5 – 6,0 МПа та в парі з контртілом на основі хрому – сплав ХЗ (HRC 62 - 63).

Схема випробувань на тертя та знос - торцеве тертя - була обрана виходячи зі статистичних міркувань і однорідності умов в області контактування (рис. 1).

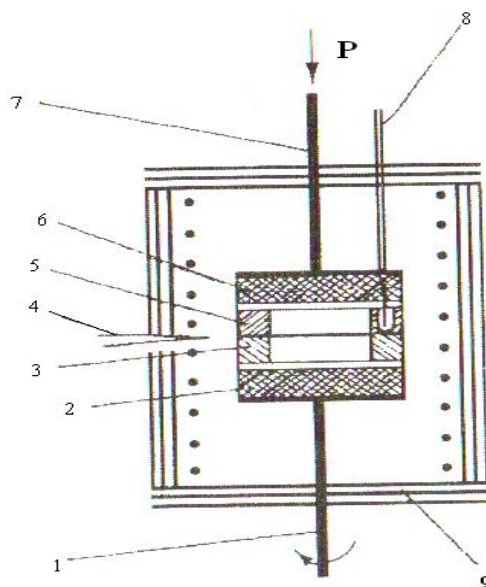


Рис. 1. Схема триботехнічних випробувань: 1 - вал; 2, 6 - теплоізолятори; 3, 5 - зразок та контртіло (пара тертя); 4 - термопара; 7 - вал навантаження; 8 - мікротермопара; 9 - піч нагрівання

Загальний вигляд поверхонь тертя контртіл на основі хромового сплаву ХЗ (ГОСТ 5905-67) при різних умовах випробувань наведено на рис. 2.

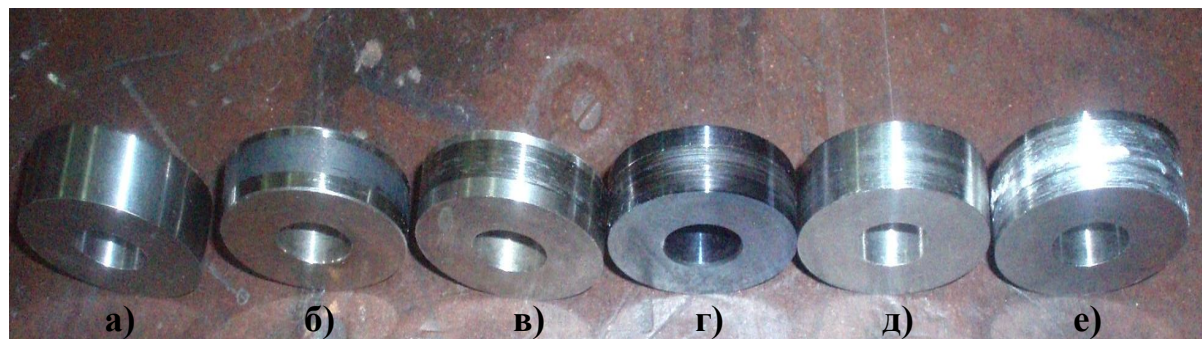


Рис.2. Загальний вигляд поверхонь тертя контртіл зі сплаву ХЗ (HRC 62 - 63) після випробувань на повітрі при 850 °С: а) вихідне контртіло до випробувань; б) початкове формування плівки тертя контртіла при V=1 м/с і P=1,5 МПа; в) остаточно сформовані плівки тертя контртіла при V= 4 м/с та P=2 МПа; г) плівка тертя контртіла після випробувань без зовнішнього нагріву при V=1 м/с і P=8МПа; д) ділянки мікросхоплення на контртілі при V=4м/с та P=4 МПа; е) ділянки мікросхоплення на контртілі при V=6 м/с та P=2,5 МПа

Під час експериментів визначали величину інтенсивності зношування та коефіцієнт тертя матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF₂ при різних швидкостях ковзання та навантаженнях на пару тертя, що наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Результати випробування на тертя та знос матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF₂

Навантаження, Р, МПа	?	I _{зразка} , МГ/КМ	I _{контртіла} , МГ/КМ	?	I _{зразка} , МГ/КМ	I _{контртіла} , МГ/КМ	?	I _{зразка} , МГ/КМ	I _{контртіла} , МГ/КМ	Контр-тіло
	Швидкість ковзання, м/с, при t=850 °С на повітрі									Сплав ХЗ (ГОСТ 5905-67) HRC 63
	1			4			6			
0,5	0,36	33	0,6	0,2	0,9	0,25	0,22	0,3	0,9	
1,0	0,27	44,2	0,1	0,2	2,65	0,3	0,21	0,5	0,8	
1,5	0,2	57	1,1	0,22	2,8	0,5	0,2	0,8	0,5	
2,0	0,2	62	0,8	0,22	7,2	1,3	0,19	6,2	0,5	
2,5	-	-	-	0,21	13,7	1,7	0,18	14,7	0,8	
4,0	0,19	85	0,2	0,19	26,2	1,8	-	-	-	
6,0	0,18	115	2,8	-	-	-	-	-	-	

Стан тертьових поверхонь засвідчив, що при випробуванні матеріалу зі швидкістю ковзання 1 м/с і навантаженні від 0,5 до 6 МПа поверхні тертя залишились

незмінними, шорсткість поверхонь R_a становила $\sim 2,5$ мкм. Лише при $P = 8$ МПа були помітні ділянки мікросхоплення на поверхні контртіла.

При випробуванні матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF_2 зі швидкістю ковзання 4 м/с та $P = 0,5 - 4,0$ МПа поверхня тертя контактної пари залишалась без видимих змін, а збільшення навантаження до $P = 6$ МПа призвело до появи ділянок мікросхоплення на поверхні контртіла.

Збільшення при трибовипробуваннях матеріалу швидкості ковзання до 6 м/с спричинило обмеження застосованого навантаження величиною $P = 4$ МПа, при якому спостерігались ділянки мікросхоплення на поверхні контртіла, що супроводжувалось зростанням μ і І.

Зазначені явища повністю корелюють з положеннями теорії тертя і зносу І.В. Крагельського щодо несучої здатності підшипнику ($P \cdot V$), яка характеризує область нормального зносу матеріалу і показує граничні значення параметрів працездатності.

Відтак досліджуваний матеріал ЭИ929 + 6% CaF_2 може утворювати щільні суцільні антизадирні плівки тертя (вторинні структури), що забезпечують високі триботехнічні характеристики (табл. 1) при відповідних швидкостях ковзання і навантаженнях за температур 850 °С на повітрі. Результати випробувань, що представлені у табл.1, показують, що для кожної швидкості ковзання існує діапазон навантажень при температурі 850 °С, за якого матеріал ЭИ 929 + 6% CaF_2 демонструє

високі триботехнічні властивості.

На рис. 3 наведено залежності коефіцієнта тертя від навантаження, що прикладається до пари тертя, при зовнішньому нагріві до 850 °С і швидкості ковзання 1 м/с. Аналогічний характер зміни μ від P спостерігається для матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF_2 з параметрами P і V в області нормального зносу (табл.1).

З графіку (рис. 3) видно, що має місце зменшення коефіцієнтів тертя матеріалу із

зростанням навантаження. У інтервалі 1,5 – 5 МПа коефіцієнт тертя матеріалу стабілізується та мінімізується при температурі 850 °С.

При цьому різниця у коефіцієнтах тертя при різних навантаженнях даного інтервалу невелика. Це пояснюється тим, що при високих температурах (~ 900 °С) інтенсивність фізико-хімічних процесів плівкоутворення настільки висока, що різниця у коефіцієнтах μ нівелюється - пружно-пластичні деформації у контакті тертя при значній товщині плівок локалізуються тільки у них, не торкаючи глибинних шарів вихідного матеріалу.

Характер залежності μ від P для матеріалу ЭИ929 + 6% CaF_2 (рис. 3) показує, що при низьких навантаженнях (0,5 - 1 МПа) μ досить високий, тобто однієї температури,

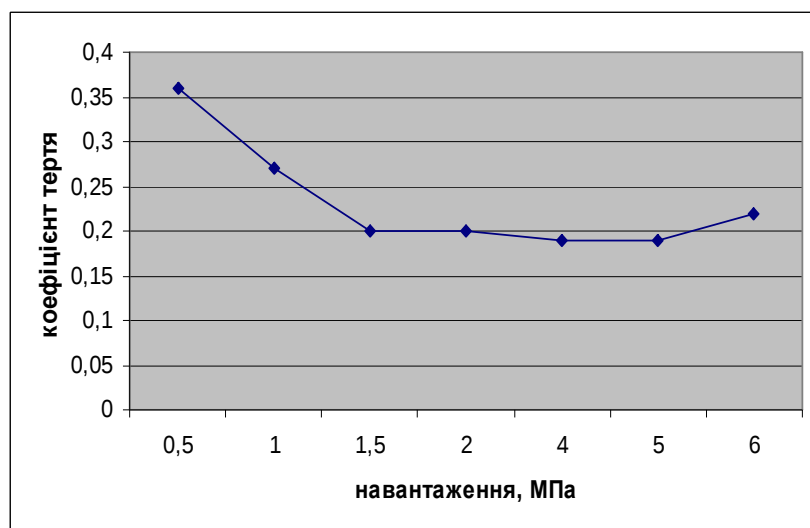


Рис. 3. Залежність коефіцієнту тертя від навантаження антифрикційного матеріалу на основі сплаву ЭИ929 при температурі 850 °С

навіть високої, не достатньо для утворення плівок тертя, що знижують μ . Із зростанням P , а саме, у інтервалі 1,5–5 МПа, мінімізується коефіцієнт тертя внаслідок інтенсифікації процесів плівкоутворення завдяки додатковому чиннику - навантаженню.

Подальше збільшення навантажень (до 8 МПа при $V=1\text{ м/с}$) призводить до того, що сумарне збільшення температури тертя від навантажень і зовнішнього нагріву викликає втрату температурної міцності поверхневого шару тертя матеріалу. Напруження досягають межі плинності, з'являється повзучість матеріалу під дією тангенціально прикладених сил тертя і антизадирна плівка «сповзає» з-під контакту. При таких явищах коефіцієнт тертя починає збільшуватись, а пара тертя втрачає свої функціональні властивості. Аналогічні явища, що призводять до схоплення (рис. 2) спостерігаються при збільшенні V до 6 м/с (табл.1).

Якісні характеристики тертя та зношування досліджували за допомогою металографічного та електронномікроскопічного методів.

Дослідження поверхонь тертя виконували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200 та за допомогою макростенду аналізатора зображення Лесо ІА-3001 та за допомогою металографічного мікроскопа Neophot-32.

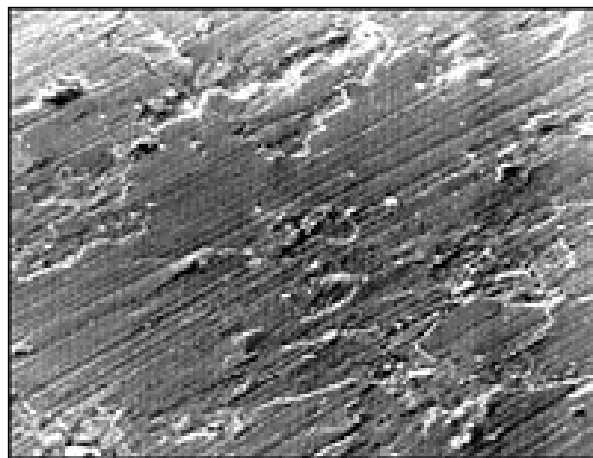
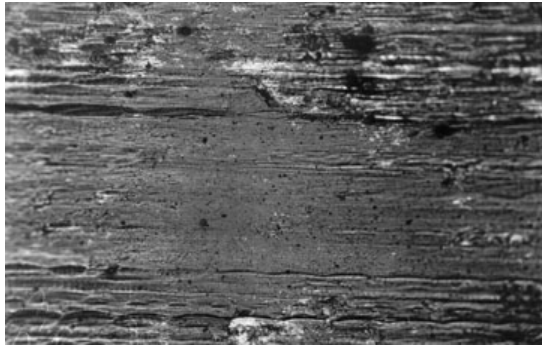


Рис. 4. Зображення топографічного рельєфу поверхні тертя матеріалу ЭИ 929+ 5% CaF_2 , $\times 120$

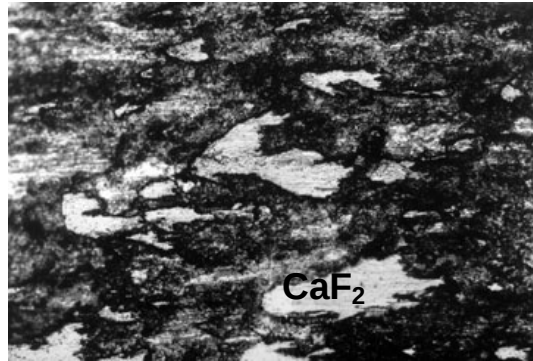
При температурах 800-900 °С та навантажуючих факторах (P , V) інтенсифікуються окислювальні процеси на тертьових поверхнях. Це призводить до утворення оксидних антизадирних плівок, до складу яких крім CaF_2 входять оксиди, зокрема, нікелю і хрому, внаслідок чого частка ювенільного металевго контакту зменшується, адгезійна та деформаційна складові коефіцієнту тертя різко падають. Утворені антизадирні плівки надійно захищають тертьові поверхні від схоплення, сприяють зниженню зносу та стабілізують роботу пари тертя (рис. 4).

Відзначимо, що подібні плівки - щільні, гладкі, блискучі мають товщину 20-30 мкм, і утворюються у два етапи: спочатку на поверхні з'являється суцільна тонка плівка темного кольору завтовшки 8-10 мкм, що покривається плямами білого кольору (CaF_2), котрі у подальшому «розмазуються», утворюючи однорідну гладку та блискучу поверхню. Приклад такого ступінчастого утворення плівки тертя для матеріалу ЭИ 929 + 5% CaF_2 зображено на рис. 5 .

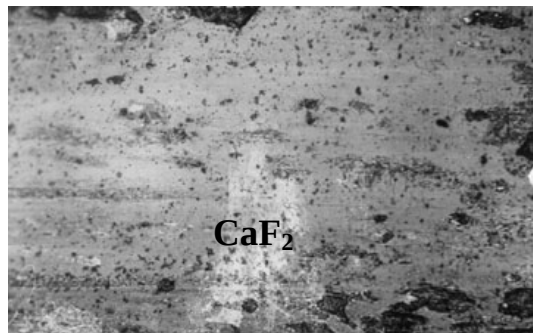
Вигляд поверхонь тертя матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF_2 та контртіла, що працювало з ним у парі, за умови стабілізації роботи пари тертя, зображено на рис.6 [5].



а)



б)



в)

Рис. 5. Етапи утворення плівки тертя (вторинних структур), $\times 200$: а) - матеріал ЕИ 929 + 5% CaF_2 ; б) та в) - контртіло із сплаву ХЗ на початку та у кінці утворення плівки тертя (білі ділянки- CaF_2)

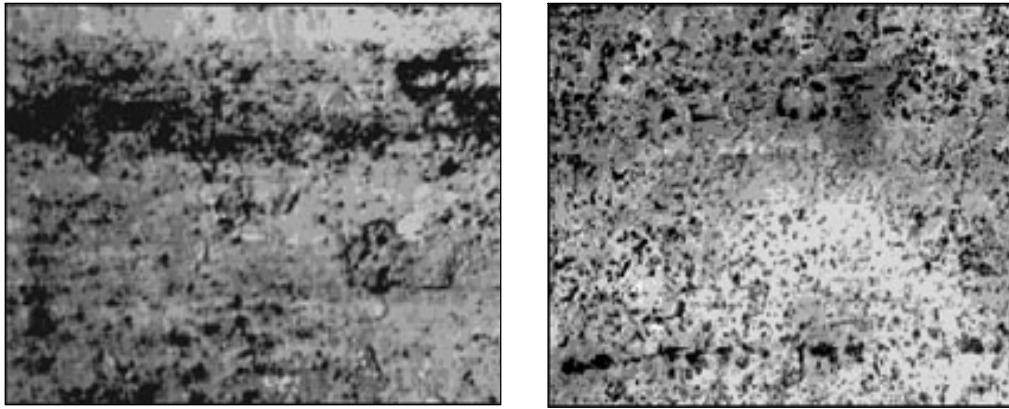
Слід підкреслити, що як на контртілі, так і на зразках, утворені у процесі тертя розділювальні блискучі плівки характеризуються безперервністю та суцільністю, на них відсутні ділянки схоплення та налипання матеріалу зразків на контртіло. Це забезпечує стабільну низьку інтенсивність зношування і мінімізує μ .

Більш докладне вивчення області працездатності антифрикційного матеріалу ЕИ 929 + 6% CaF_2 показало (рис. 7), що у широкому діапазоні умов тертя - температури від 700 до 900 $^{\circ}\text{C}$, питомі навантаження від 1 до 6,0 МПа, інтенсивність зношування композиційного матеріалу нижча, ніж литого сплаву ЕИ 929.

Найбільш суттєва перевага композиційного матеріалу перед литим сплавом виявляється при 700 $^{\circ}\text{C}$ та достатньо високих навантаженнях (5 МПа). Напевно, це пов'язано з тим, що за цих температурах у литого сплаву ЕИ 929, як у жаростійкого, інтенсивність плівкоутворення ще недостатня, і плівки тертя, що повинні забезпечувати зниження зносу, здираються швидше, ніж утворюються [5]. Навпаки, у композиційного матеріалу вступає у силу фактор присутності твердої змазки CaF_2 , який сприяє комплексному (разом з оксидами) плівкоутворенню, це, у свою чергу, призводить до зниження рівня пластичної деформації у зоні тертя (вони локалізуються у плівці), що підвищує зносостійкість композиційного матеріалу порівняно з литим сплавом, особливо за підвищених температур, коли знеміцнення матеріалів відбувається швидше, ніж при

більш низьких температурах.

Таким чином, підсумовуючи результати досліджень зносостійкості матеріалів, їх поведінки при терті, здатності утворювати при певних умовах плівки тертя потрібної якості можна зробити висновок, що на зносостійкість та коефіцієнт тертя матеріалів на основі нікелевого сплаву ЕИ 929+ CaF_2 істотно впливають параметри навантажуючих факторів тертя, що обумовлюють утворення антизадирних плівок, які і визначають експлуатаційні характеристики виробу.



а)

б)

Рис. 6. Поверхня тертя зразка з матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF₂
(а) та контртіла (б), $\times 300$

Вибір матеріалів, які забезпечують працездатність пар тертя ковзання, у кожному окремому випадку можна зробити лише на основі ретельного зіставлення умов роботи тертьових деталей, вихідних властивостей матеріалів і тих змін, які вони зазнають, на

поверхнях тертя. Відмітимо деякі правила підбору матеріалів, якими користувались при дослідженнях:

1. Сполучати твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя при роботі.

2. Сполучати твердий матеріал з твердим.

3. Уникати сполучень м'якого матеріалу з м'яким, а також однойменних матеріалів (незагартована сталь по незагартованій, Al по Al; Cr по Cr; Ni по Ni).

4. Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя та змазуючих присадок до них створювати при роботі пари умови реалізації

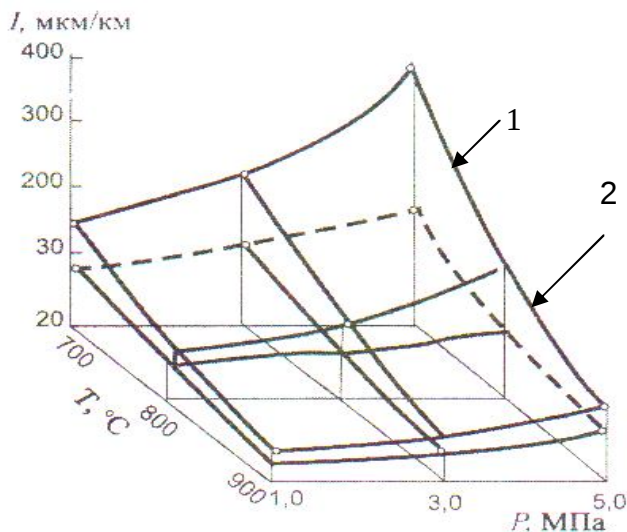


Рис. 7. Інтенсивність зношування литого сплаву ЭИ 929 (1) та композиційного матеріалу ЭИ 929 + 6% CaF₂ (2), $V=0,32$ м/с

режиму вибіркового перенесення.

Отже, керуючись першим правилом для збільшення несучої здатності та забезпечення оптимальних триботехнічних властивостей антифрикційні матеріали виготовляли з порошкоподібних матеріалів і сплавів синтезом за різними технологічними режимами. Причому, оскільки CaF₂ – тверде мастило-наповнювач, то при роботі він спочатку зношується (диспергується в зоні тертя), утворюючи на поверхнях взаємодіючих деталей тонкі плівки (рис.5), знижуючи тим самим міжатомні і міжмолекулярні взаємодії і, отже, силу тертя. Тобто реалізується четверте правило,

коли стає можливим використання так званого «ефекту беззношуваності» у вузлах тертя - створюється режим вибіркового перенесення [6].

Вибір у ролі контртіла сплаву із хрому ХЗ (ГОСТ 5905-67) для роботи у парі з антифрикційним композиційним матеріалом ЭИ 929+ 6% CaF₂, обумовлено його теплостійкістю і збереженням високої твердості та міцності до високих температур (до 900 °С), коли застосування інших матеріалів, навіть окалиностійких сталей , що можуть після загартування дати високу твердість, виявилось неможливим [4, 5].

Отже, основними умовами можливості використання нових матеріалів у ролі антифрикційних композитів для високих температур є застосування в парі з ними контртіл з твердістю не менше 59-60 HRC_e, яка зберігається на протязі всього періоду роботи. В нашому випадку вибір матеріалу контртіла обумовлено вищезазначеними причинами, а також умовами роботи і вимогами натурних вузлів тертя.

Таким чином, при інших однакових умовах коефіцієнт тертя та знос при підвищених температурах залежить також від властивостей матеріалу контртіла.

На основі проведених досліджень можна зробити висновки:

1. Показано, що на працездатність високотемпературних антифрикційних матеріалів на основі нікелевого сплаву ЭИ 929 з домішками фториду кальцію впливають параметри режимів роботи, несучої здатності матеріалу і властивості контртіла.
2. Виявлено, що утворення антизадирих плівок (вторинних структур), що забезпечують мінімальний коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування як матеріалу підшипнику, так і контртіла пов'язано з параметрами роботи вузла тертя, де матеріал здатний проявляти свої максимальні службові характеристики.
3. Обґрунтовано вибір матеріалу контртіла, який повинен повною мірою відповідати умовам експлуатації, а саме, для роботи при високих температурах на повітрі, змінних швидкостях ковзання і навантаженнях, повинен відрізнятися високою теплостійкістю, жаростійкістю і зберігати ці властивості протягом всього періоду експлуатації.
4. На основі виконаних досліджень можна рекомендувати найраціональніші режими експлуатації матеріалу при температурі 850 °С на повітрі: при V=1 м/с діапазон навантажень складає P=0,5-6 МПа; при V= 4 м/с і P=0,5-4 МПа і нарешті при V=6 м/с P= 0,5-2,5 МПа. При зазначених умовах забезпечується тривала і надійна робота високотемпературного вузла тертя.

Список літератури: 1. Роїк Т.А, Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 404 с. 2. Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Холяк В.В. Особливості формування структури і властивостей композиційних матеріалів на основі сплаву ХН55ВМТКЮ// Сб. трудов XV Междунар. Науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века» 15-20 сентября 2008, г.Севастополь, Т.3.-Донецк: ДонНТУ, 2008.- С.213-220. 3. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. Думка, 1980. – 404 с. 4. Роик Т.А. Подшипниковые высокотемпературные материалы на основе металлических порошков-отходов // ТЕМА. – 1999. - № 2. – С. 3 - 8. 5. Роик Т.А. Инженерия антифрикционных композитов с никелевой матрицей // Вісн. НТУУ «КПІ» «Машинобудування». – 2000. – Вип.. 39. – С. 111 – 115. 6. Roik T. A., Kirichok P.O., Gavrish A.P., Gavrish O.A. – Antifriction materials for the friction units of the high-speed polygraphic equipment // Technology and technics printing. – 2007. № 1-2. – P.65-73.

Сдано в редакцию 27.01.09.