

УДК 629.083

¹О.І. Щепотьєв, канд. техн. наук²В.В. Варюхно, канд. техн. наук³Т.І. Кузьменко⁴Л.В. Бурдюженко

ТРИБОТЕХНІЧНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

^{1,2,3}Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail:aki@nau.edu.ua⁴Інститут екології та дизайну НАУ, e-mail:ied@nau.edu.ua

Розглянуто вплив елементоорганічних присадок на закономірності зношування покриттів. Установлено основні трибохімічні процеси, що обумовлюють опір зносу.

Вступ

Одним із визначальних факторів працездатності і довговічності деталей у терті машин є стан мастильного середовища.

Межове мащення для навантажених кінематичних пар тертя – найбільш небезпечний і найменш вивчений розділ загальної проблеми мащення машин у зв'язку зі складністю охоплюваних нею абсорбційних, хемосорбційних і хімічних явищ [1; 2].

Виконані дослідження спрямовані на розкриття закономірностей зношування гетерогенних покриттів при експлуатації в різних мастильних середовищах, з'ясування механізмів впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) на інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя і навантажувально-швидкісний діапазон, встановлення областей стійкого прояву ефекту структурної пристосованості.

Методи досліджень

Досліджувалися процеси тертя і зношування гетерогенних покриттів в інактивному маслі (вазелинове масло) і в маслі, активованому домішками ПАР.

Випробування на знос здійснювалися на спеціальній машині тертя типу УМТ при регульованій подачі масла в зону контакту зразків ($D \times d = 25 \times 17,5$ мм).

Товщина покриттів після доведення становила 0,18–0,20 мм, шорсткість поверхні $R_a = 0,63–0,32$.

В умовах межового мащення були випробувані композиційні гетерогенні покриття на основі нікелю (Ni-Al-Si), заліза (Fe-Ni-Cr-Al-B) і карбиду хрому (Cr-C-Ni-Cr).

Зразки контртіла були виготовлені із широко використовуваних матеріалів типу 30ХГСА, 38ХМЮА. Сталі 45, БрО14, АО-20 як мастильні середовища використовували вазелинове масло; вазелинове масло з домішками ПАР (2% олеїнової кислоти), мінеральне масло МС-20 з наступним диференційованим введенням сірко-, хлоро-

і фосфоровмісних присадок, моторне масло М-10Г2; синтетичне масло Б-3В.

Вибір інактивного мастильного середовища поряд з маслами, що містять ПАР і присадки, пов'язаний із з'ясуванням основних процесів закономірностей механізмів зношування композиційних гетерогенних покриттів в умовах межового тертя і дослідженням впливу присадок на кінетику утворення вторинних структур з тими чи іншими властивостями.

Результати досліджень

З метою вивчення впливу легуючих елементів на процеси тертя трикомпонентних гетерогенних покриттів на основі нікелю з додаванням Al, Si була досліджена їхня структура як у вихідному стані, так і після досліду на зношування.

Для оцінки фазового складу покриттів використаний комплексний підхід із застосуванням рентгеноструктурного і металографічного аналізу.

Згідно з діаграмами стану систем Ni-Al, Ni-Si у структурі покриття, напиленого композиційним порошком Ni-Al-Si, можуть бути присутні такі фазові складові: тверді розчини Ni у Al, Ni у NiAl, Ni у Ni₃Al, Si у Ni₃Al, Al у Ni, Si у Ni, і так само інтерметалічні з'єднання: NiAl, Ni₃Al, Ni₂Al₃.

Крім того, при напилюванні в середовищах, що містять кисень, повинні бути присутніми окисли нікелю, алюмінію, кремнію, що утворюються при напилюванні. Однак потрібно враховувати, що високі швидкості охолодження при формуванні покриття можуть призвести і до утворення металостабільних фаз типу Ni₂Al₃.

Рентгенофазовий і металографічний аналіз вихідного стану покриттів (до дослідження на тертя) показав, що характерною рисою мікроструктури є багатофазність і дрібнодисперсність. На рентгенограмах таких покриттів присутні лінії фаз Ni₃Al і NiSi, а також окислів Al₂O₃, NiO, SiO₂, причому за інтенсивностями ліній можна відзначити, що фази Ni₃Al містяться в процентному відношенні більше, ніж NiSi.

Додаткові металографічні дослідження дозволили встановити, що в складі покриття знаходиться вільний, не прореагований з нікелем кремній, у вигляді окремих включень.

Після досліджень покриттів в умовах межового мащення мікроструктура і фазовий склад поверхні тертя трохи змінилися. На рентгенограмах таких покриттів значно знижена інтенсивність лінії фази Ni_3Al , з'являються лінії фаз Ni_2Al_3 , Ni_2Si і $\delta-Ni_2Si$. Додатковими металографічними дослідженнями наявність вільного кремнію на поверхні тертя не виявлено. Це означає, що в процесі тертя на плямах контакту відбуваються структурні перетворення з утворенням нових фаз. Вільний, не прореагований у процесі виготовлення і напилювання кремній, утворить твердий розчин Si у Ni_3Al . За рахунок цього зменшується вміст фази Ni_3Al і з'являються нові дрібнодисперсні фази Ni_2Si і $\delta-Ni_2Si$. Одночасно локальний розігрів на плямах фактичного контакту і швидке охолодження після виходу з нього створюють умови для утворення металостабільної фази Ni_2Al_3 . Крім того, поява дрібнодисперсних тугоплавких фаз значно змінює структуру нікелевої матриці, забезпечуючи значне зміцнення.

Дрібнодисперсна і гетерогенна будова покриттів підтверджується дослідженнями, виконаними на мікроаналізаторі. На рис. 1 зображено мікрофотографії деяких структурних особливостей розподілу компонентів покриттів, що працюють в умовах мащення.

Для підтвердження явища сегрегації легуючих елементів до поверхні тертя й одержання кількісної і якісної оцінок змісту алюмінію і кремнію на поверхні тертя були проведені дослідження з застосуванням оже-спектроскопії. Проводився оже-спектральний аналіз поверхні тертя безпосередньо і після іонного травлення до глибини 5000 Å. Виявлено, що хімічний склад поверхні тертя і підповерхневого шару значно відрізняється.

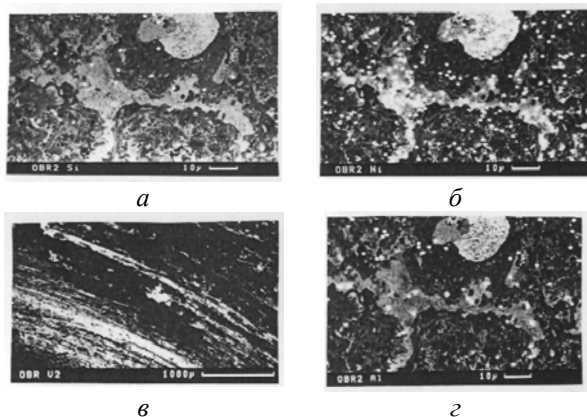


Рис. 1. Поверхня тертя покриттів (а) і розподіл зон локалізації Ni (б), Si (в), Al (г) у мікрооб'ємах поверхневого шару

Крім основного елемента, нікелю, на поверхні тертя присутні алюміній, кремній, кисень, фосфор, сірка, хлор і вуглець. Кількісний аналіз вмісту перелічених елементів на поверхні поданий у табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл елементів на поверхні

Елемент	Поверхня тертя, %	Глибина 5000 Å, %	Матриця матеріалу, %
P	5,4	1,8	-
S	6,4	1,4	-
Cl	1,5	0,4	-
C	4,9	0,3	-
O	23,8	26,4	4,3
Ni	30,8	32,1	83,4
Al	16,4	22,6	7,5
Si	10,8	15,0	4,8

При пошаровому іонному травленні матеріалу з одночасним хімічним аналізом була встановлена закономірність розподілу хімічних елементів.

Максимальний вміст алюмінію і кремнію виявлено в підповерхневому шарі, на глибині до 5000 Å, що перевищує в три рази вміст у матриці матеріалу. Подібним чином поводить себе і кисень, що дифундує в області сегрегації алюмінію і кремнію, утворюючи дифузійні ділянки, що складаються з оксидів.

У такий спосіб за допомогою оже-електронної спектроскопії був проаналізований розподіл вхідних до складу покриття легуючих елементів алюмінію і кремнію при роботі покриття в мастильних середовищах, що містять фосфоро-, сірко-, хлоровмісні присадки. Проведений аналіз показав, що алюміній і кремній дифундують з об'єму матеріалу до поверхневого і підповерхневого шарів. У поверхні знаходиться близько 17 % алюмінію, близько 8 % кремнію (залежно від режиму тертя). У підповерхневому шарі їхній вміст збільшується до 20 і 10 % відповідно.

Розподіл кисню за глибиною покриття має той самий характер, що і розподіл алюмінію і кремнію. При цьому максимальний вміст фосфору, сірки, хлору переважно зареєстровано на поверхні тертя і швидко зменшується за глибиною травлення. Ці елементи дифундували з мастильного середовища, оскільки в матриці матеріалу вони реєстрували на рівні фону.

Наявність кисню в матриці матеріалу пояснюється окиснюванням алюмінію і кремнію, що містяться в частках порошку, у процесі напилювання.

Дослідження впливу ступеня ПАР на закономірності тертя і зношування гетерогенних покриттів проводилися окремо.

Як мастильне середовище використовувалося чисте (неполярне) вазелінове масло і вазелінове масло з домішкою 2 % маси одноосновної ненасиченої олеїнової кислоти. Оптимальну концентрацію олеїнової кислоти знаходили експериментально. Оцінку мастильних властивостей визначали за коефіцієнтом тертя. У міру підвищення вмісту олеїнової кислоти до 2 %, коефіцієнт тертя, зменшуючись, досягає постійного рівня, на якому залишається стабільним до концентрації одноокисної кислоти, що відповідає майже 45 % маси. Таким чином, оптимальна концентрація олеїнової кислоти у вазеліновому маслі, що відповідає мінімізації параметрів тертя, становила 2 % маси. Крім того, для порівняння отриманих результатів аналогічні пари тертя за тими самими програмами випробували в середовищі мінерального масла МС-20.

Результати дослідження зображені на рис. 2 при випробуванні покриттів у середовищі вазелінового масла, у якій не містяться ПАР, спостерігається мінімальна величина зносу при максимальному коефіцієнті тертя (крива 1).

При додаванні у вазелінове масло ПАР інтенсивність зношування збільшується майже в два рази при одночасному зниженні коефіцієнта тертя (рис. 2, крива 2).

Діапазон нормального зношування по навантаженню при мастильній дії вазелінового масла порівняно невисокий, до 8 МПа, і значно поширюється при введенні ПАР до – 13 МПа.

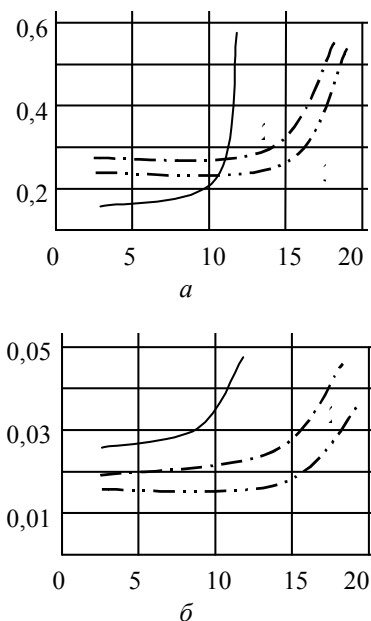


Рис. 2. Зміна інтенсивності зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) залежно від питомого навантаження при $V=0,8$ м/с:

1 – у середовищі вазелінового масла; 2 – у середовищі вазелінового масла з домішкою ПАР; 3 – у середовищі мінерального масла МС-20

Помітне зниження коефіцієнта тертя і збільшення границі стійкості, що визначає діапазон експлуатації, пов'язано з хемосорбцією кисню на поверхні тертя й утворення захисних вторинних структур оксидів, а також з ефектом фізично адсорбованих ПАР, що обумовлюють пластифікування. Причому збільшення навантаження робить більш діючий вплив, ніж підвищення швидкості ковзання, що, виходячи з прояву ефекту Ребиндера, пов'язано з нерівноважним активованим станом поверхневого шару й орієнтованою в процесі тертя структурою.

Вазелінове масло, що містить у своєму складі ПАР, що адсорбуються на поверхнях деформованого при терті покриття, викликає адсорбційне пластифікування, тобто здатність до більш інтенсивної деформації (ковзання йде за багатьма системам кристалографічних площин) у тонкому поверхневому шарі товщиною в частки мікрометра. При цьому ПАР полегшують вихід дислокацій до поверхні деформованого покриття, що зменшує внутрішні напруження і запобігає поширенню деформації всередину зразків.

На рис. 3 показано зміни дислокаційної структури під час тертя в середовищі вазелінового масла (а) і в умовах мащення з додаванням ПАР (б).

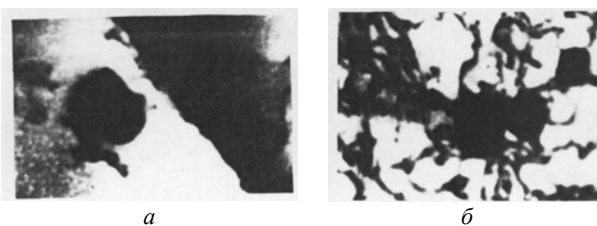


Рис. 3. Дислокаційна структура покриття на основі нікелю, випробуваного при терті у вазеліновому маслі (а), у середовищі вазелінового масла з додаванням ПАР (б), 35000

Полегшення зсувоутворення в присутності ПАР у кінцевому рахунку призводить до значного зміцнення тонкого поверхневого шару внаслідок сильних перекручувань ґрат.

Зміни параметрів кристалічних ґрат під впливом навантажень, температур, наклепу і фазових перетворень не протікають рівномірно через локалізацію деформацій в окремих об'ємах, порівняних з ділянками фактичного контакту.

Центральні об'єми часток з неспотвореними кристалічними ґратами менш міцні і мають менший опір деформації, будучи потенційними місцями схоплювання, а області, що прилягають до меж зерен чи до ділянок з перекрученими кристалічними ґратами, виявляються більш міцними. Ця локалізація й обумовлює на поверхнях тертя покриттів неоднорідність механічних властивостей, обумовлених регресією до середнього рівня.

Для аналізу процесів важливим є розподіл мікротвердості від поверхні тертя за глибиною деформованого шару.

На рис. 4 подано результати виміру мікротвердості за глибиною деформованого шару для трьох мастильних середовищ. Точка, що відповідає мікротвердості $H_{\mu}=3700$ МПа, характеризує мікротвердість вихідного зразка до дослідження на тертя.

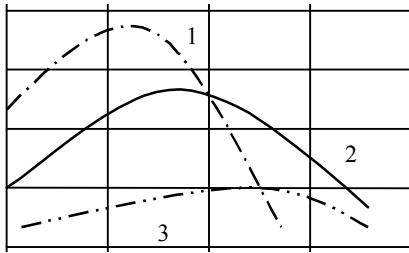


Рис. 4. Зміна мікротвердості поверхні тертя за глибиною деформованого шару при роботі: 1 – у вазеліновому маслі, що містить ПАР; 2 – у мінеральному маслі МС-20; 3 – у вазеліновому маслі

При роботі у вазеліновому маслі (рис. 4, крива 3) мікротвердість поверхневого шару підвищується незначно, до $H_{\mu}=5880$ МПа, глибина деформованої зони досягає $h=1,78$ мкм. Додавання у вазелінове масло ПАР (крива 1) істотно підвищує мікротвердість поверхні тертя ($H_{\mu}=14\,500$ МПа) при одночасному зменшенні глибини деформованого шару ($h=1,14$ мкм).

Крива 2, отримана під час тертя в середовищі мінерального масла МС-20, займає проміжне положення. Ступінь виникаючого наклепу при деформуванні поверхні покриття значно зростає в присутності ПАР, тобто підвищується мікротвердість наклепаного шару, що істотно впливає на протиспрацьовувальні властивості покриття і сприяє збільшенню межі текучості матеріалу поверхневого шару, а, отже, розширенню діапазону нормального зношування як за навантаженням, так і за швидкістю ковзання. Це відбувається при зовнішньому ефекті Ребіндера, що виявляється при роботі покриттів у середовищі, яке містить ПАР.

У першу чергу, цим пояснюється значне збільшення навантажувально-швидкісного діапазону роботи покриття в порівнянні з мастильним середовищем, що не містить ПАР. Однак наявність ПАР під час тертя детонаційних покриттів викликає небажані конкуруючі процеси. Так, одночасно з зовнішнім ефектом Ребіндера виявляється внутрішній ефект [3], який відбувається в процесі адсорбції ПАР на внутрішніх поверх-

нях пар, що відіграють роль зародків мікротріщин. Це призводить до зниження роботи, затраченої на утворення нових поверхонь і полегшення розвитку мікротріщин, що виявляється в підвищенні крихкості і різкому збільшенні зносу покриттів.

Зворотна залежність спостерігається при вимірюванні коефіцієнта тертя. Максимальне значення коефіцієнта тертя відповідає вазеліновому маслу, мінімальне – мінеральному маслу МС-20, що, в першу чергу, можна пояснити не тільки наявністю в мінеральному маслі МС-20 ПАР, але і його підвищеною адсорбацією до поверхні тертя за рахунок більш високої кінетичної в'язкості в порівнянні з вазеліновим маслом.

Як показали проведені експериментальні дослідження, ПАР значно впливають на процес тертя і зношування детонаційних покриттів. При відсутності в маслі ПАР спостерігається мінімальний знос при незначному навантажувально-швидкісному діапазоні і високому коефіцієнті тертя.

Додавання в масло ПАР значно розширює навантажувально-швидкісний діапазон, знижує коефіцієнт тертя, але при цьому збільшується знос, оскільки відбувається одночасна дія внутрішнього і зовнішнього ефектів Ребіндера.

Використовуючи наведені результати про дію внутрішнього і зовнішнього ефектів Ребіндера в процесі межового мащення, можна припустити такий механізм зношування детонаційних покриттів за наявності мастильного середовища.

У процесі контактної взаємодії не тільки деформуються поверхневі шари, зерна, але і змінюється їхня орієнтація, тобто текстурування. Іншими словами, поверхня тертя пристосовується до діючої схеми механічних напруг, що видно на мікрофотографіях поверхонь (рис. 5.) з різними режимами тертя.

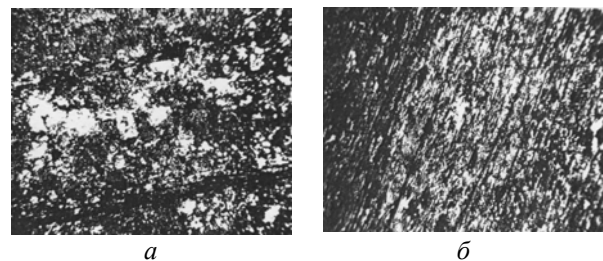


Рис. 5. Текстурування поверхонь тертя детонаційних покриттів при $V=0,8$ м/с (x320): а – $P=5$ МПа; б – $P=15$ МПа

Наявність ПАР за допомогою прояву зовнішнього ефекту Ребіндера на поверхні тертя сприяє формуванню структур, що обумовлюють явище пристосованості.

Якщо напруга при терті не перевищує межі текучості матеріалу, що залежить від розміру осередків, відбувається нормальне зношування.

Якщо напруга під час тертя стає більше межі текучості матеріалу, відбувається руйнування. При цьому стінки осередків, орієнтованих перпендикулярно напрямку тертя, ініціюють початок руйнування, оскільки є концентраторами напруг і джерелами мікротріщин.

Одночасно при роботі такого матеріалу, як гетерогенне покриття, що містить тугоплавкі фази, буде відбуватися утворення мікропорожнеч у підповерхневому шарі, а наявність незначної пористості в матеріалі при одночасній дії внутрішнього ефекту Ребіндера сприяє розкриттю порожнеч і утворенню мікротріщин, що призводить до утворення часточок зносу.

Отже, під час тертя гетерогенних покриттів за наявності мастильного середовища важливу роль буде відігравати ПАР у маслі, що обумовлюють прояв різних видів ефекту Ребіндера і визначають механізм зношування матеріалу.

При проведенні дослідів щодо визначення ступеня впливу елемента органічних присадок на процеси тертя і зношування покриттів як базове було обрано мінеральне масло МС-20, в яке диференційовано додавалися елементоорганічні присадки: фосфоровмісні – трикрезилфосфат, сірковмісні – вільна сірка; хлоровмісні – хлористий бензол.

Вміст вільної сірки в маслі дорівнював 0,25 % маси, фосфору і хлору – до 1 % маси. Можливість застосування зазначених вище присадок при мащенні гетерогенних покриттів потребує детального вивчення.

Як показали проведені дослідження (рис. 6), органічні сполуки фосфору, сірки і хлору мають високі антизадири і протиспрацьовувальні властивості і здатні утворювати на тертьових поверхнях гетерогенних покриттів вторинні структури, що захищають від зносу і схоплювання.

При мащенні поверхонь тертя гетерогенного покриття системи Ni-Al-Si найбільш ефективна сірковмісна присадка (рис. 6, крива 3), оскільки вона забезпечує широкий діапазон нормального зношування незначної інтенсивності.

Сірковмісна присадка створює на поверхні тертя покриття плівки сульфідів (установити точно фазовий склад вторинних структур не вдалося через незначну товщину), що відрізняються досить високою твердістю, міцністю і температурою плавлення. Однак тверді плівки сульфідів мають значний опір зрушенню, що обумовлює більш високий коефіцієнт тертя (рис. 6) у порівнянні з іншими присадками.

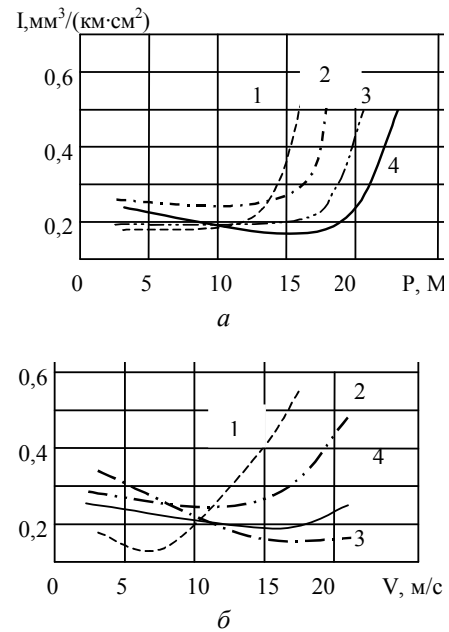


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування покриттів від питомого навантаження при $V = 0,8$ м/с (а) і швидкості при $P = 5$ Мпа (б): 1 – у середовищі мінерального масла МС-20; 2 – у середовищі мінерального масла МС-20+P; 3 – у середовищі мінерального масла МС-20+S; 4 – у середовищі мінерального масла МС-20+Cl

Оскільки сульфідів утворюються при більш високих температурах у порівнянні з іншими присадками [4; 5], позитивні ефекти під час межового тертя виявляються тільки при високих навантаженнях і швидкостях ковзання, коли температура в зоні фрикційного контакту значно зростає (рис. 6, крива 3). При незначних навантаженнях і швидкостях ковзання застосування сірковмісних присадок неефективно.

Зворотний ефект щодо інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і діапазону нормального зношування має фосфоровмісна присадка (рис. 6, крива 2).

Фосфоровмісна присадка ефективна при незначних навантаженнях і швидкостях ковзання. Отже, фосфор починає реагувати з поверхнею тертя детонаційного покриття при низьких температурах, утворюючи при цьому ефективні плівки вторинних структур типу Ni_2 , Ni_3 , Al, які мають високу рухливість, здатність до самовідновлення дефектів на поверхні тертя і створення шаруватої структури. Ці плівки, як показали дослідження, на легких режимах тертя мають високі протиспрацьовувальні властивості і забезпечують досить низькі коефіцієнти тертя. Однак при збільшенні навантаження чи швидкості ковзання спостерігається значне підвищення температури у вузлах тертя, що супроводжується чіт-

ким шлакоутворенням на зразках. Це можна пояснити тим, що фосфор, як і алюміній, екзотермічно реагує з нікелем. Тепловий ефект близький до ефекту при синтезі інтерметалідів [6]. Дана обставина значно знижує навантажувально-швидкісний діапазон пари тертя і тому застосування масел з фосфоровмісними присадками в тяжконавантажених вузлах тертя небажано.

Фосфоровмісні присадки при роботі гетерогенних покриттів діють переважно в області незначних навантажень і швидкостей ковзання при порівняно низьких температурах, тому даний клас присадок не можна розглядати як засіб ефективного захисту гетерогенних покриттів від задирів, що відбувається при високих температурах.

Хлорна присадка, що утворює на поверхні тертя гетерогенне покриття плівки хлоридів, займає проміжне положення фосфоро- і сірковмісних присадок (рис. 6, крива 4). Хлориди утворюються, в основному, при високих температурах [7] так що ефективна дія цієї присадки виявляється в області високих навантажень і швидкостей ковзання. Однак хлориди плавляться при більш низькій температурі, ніж сульфід. Це відбивається на верхній межі працездатності хлоровмісних присадок, що нижче ніж у сірковмісних, але вище, ніж у фосфоровмісних.

Одночасно була проведена оцінка впливу моторних масел, що випускаються серійно і містять комплекс присадок, мінерального масла М-10Г₂ і синтетичного масла Б-3В на інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя і навантажувально-швидкісний діапазон гетерогенних покриттів.

З аналізу результатів випливає, що досліджувані масла, до складу яких належать комплексні присадки, значно поліпшують триботехнічні параметри, одночасно знижуючи інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя і розширюючи діапазон нормального зношування за навантаженням (рис. 7, криві 2, 3) щодо базового мінерального масла МС-20 (рис. 7, крива 1).

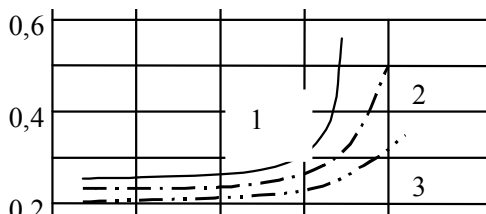


Рис. 7. Інтенсивність зношування покриттів при $V=0,8$ м/с:
1 – у середовищі мінерального масла МС-20; 2 – у середовищі масла М-10М; 3 – у середовищі синтетичного масла Б-3В

Ефективність застосовуваних присадок в умовах експериментів з гетерогенними покриттями неоднакова й у загальному вигляді механізм їхньої взаємодії зводиться до спільної дії хемосорбції кисню й адсорбції ПАР на активованих поверхнях тертя. При мащенні поверхонь тертя гетерогенних покриттів найбільший ефект дає сірковмісна присадка, потім в спадному порядку, хлор містка і фосфоровмісна.

Хімічна природа поверхонь визначається, з одного боку, впливом навколишнього середовища, у т. ч. мастил, а з іншого боку – хімічним складом самого матеріалу. При впливі навколишнього середовища і мастил відбуваються хімічні реакції на поверхнях тертя покриттів, що істотно змінюють їх склад і значно позначаються на процесі тертя і зношування. Сегрегаційні процеси легуючих елементів матеріалів, навіть при незначній процентній зміні складу істотно впливають на його поверхневі властивості.

Обговорення впливу вказаних факторів на процес тертя і зношування детонаційних покриттів доцільно починати з триботехнічних явищ на поверхні тертя покриттів на основі нікелю.

Для цього був проведений комплекс досліджень у різних мастильних середовищах, що мають фосфоро, сірко- і хлоровмісні присадки. Оже-електрона спектроскопія поверхонь тертя з пошаровим іонним травленням і кількісним хімічним аналізом на глибину до 5000 Å підтверджує дифузію таких елементів, як фосфор, сірка, хлор, вуглець і кисень з мастильного середовища в поверхню покриття, причому відбувається нерівномірний розподіл елементів, що дифундують.

У процесі іонного травлення визначався кількісний хімічний склад елементів для покриття, що працювало в маслі з фосфоровмісною присадкою, поданий у табл. 2.

Аналогічні дослідження виконано в середовищі із сірковмісною і хлоровмісною присадками (табл. 3).

Таблиця 2

Розподіл елементів покриття при роботі в маслі з фосфоровмісною присадкою

Елемент	Поверхня тертя, %	Глибина 5000 Å, %	Матриця матеріалу, %
P	7,4	1,2	-
S	2,0	0,3	-
Cl	1,4	0,2	-
C	6,1	0,4	-
O	18,3	20,1	4,0
Ni	37,3	45,3	83,2
Al	17,7	20,4	7,8
Si	9,8	12,1	5,0

Таблиця 3

**Розподіл елементів покриття при роботі
в маслі із сірковмісною присадкою**

Елемент	Поверхня тертя, %	Глибина 5000 Å, %	Матриця матеріалу, %
P	2,1	0,2	-
S	6,4	0,3	-
Cl	1,6	0,1	-
O	8,3	0,2	-
C	17,7	20,4	4,3
Ni	38,5	47,5	83,4
Al	17,1	21,1	7,5
Si	8,3	10,2	4,8

З аналізу отриманих результатів випливає, що при роботі в мастильних середовищах різні елементоорганічні присадки, хімічно активні елементи, такі, як фосфор (табл. 2), сірка (табл. 3.) дифундують у поверхневий шар, тим самим значно знижують поверхневу енергію, сприяючи створенню захисних вторинних структур, що позитивно впливає на процес тертя.

Великий відсоток вмісту даних елементів спостерігається на поверхні покриттів (фосфору – 7,4 %; сірки – 6,4 %; хлору – 6,2 %) і різко зменшується за глибиною. Проведені раніше дослідження дозволяють припустити, що сегрегація таких елементів, як фосфор, сірка, хлор, вуглець, дифундувавши з мастильного середовища, призводить до утворення в поверхневих шарах покриття евтектики з низькою температурою перетворення, тобто до умов, коли фазові перетворення спостерігаються при порівняно низьких температурах.

Висновки

У поверхневому шарі відбуваються зміни хімічного складу, структури і властивостей, що виникають у процесі дисипації механічної енергії навантажених тертям покриттів. При цьому основним явищем, що контролює ці зміни, виступає дифузія хімічно активних елементів з мастильних середовищ і їх трибохімічна взаємо-

дія. Отже, поблизу поверхні й у шарах, що безпосередньо межують із зовнішнім середовищем, енергетичні зміни призводять до значного підвищення термодинамічної стабільності поверхневого шару, по-перше, за рахунок поверхневого насичення хімічно активними елементами присадок, що містяться в мастилах, по-друге, внаслідок сегрегації вхідних до складу покриттів легуючих елементів у навантаженні тертям поверхневі шари покриттів. Зменшення вільної поверхневої енергії пов'язано з анігіляцією вакансії в поверхневому шарі, наслідком чого є більш повна реалізація сил міжатомних зв'язків, що, у свою чергу, збільшує опір пластичної деформації і, таким чином, сприяє розширенню діапазону структурної пристосованості покриттів у даних умовах тертя, тобто в режимі межового напруження насичення хімічно активними домішками, що беруть участь у терті покриттів, дозволяє змінювати структурно-фазовий стан поверхневого шару і забезпечити тим самим тривалу стабільність і триботехнічну зносостійкість їхньої структури в процесі експлуатації.

Список літератури

1. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном контакте. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
2. *Решетов Д.Н.* Работоспособность и надежность деталей машин. – М.: Высш. шк., 1989. – 205 с.
3. *Розенберг Ю.А.* Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 168 с.
4. *Виноградов И.Э.* Противоизносные присадки и масла. – М.: Химия, 1989. – 272 с.
5. *Хайник Г.* Трибохимия. – М.: Мир, 1987. – 582 с.
6. *Гушинский Л.И.* Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
7. *Протасов Б.В.* Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозировании его долговечности. – Саратов: Саратов. ун-т, 1982. – 148 с.

Стаття надійшла до редакції 17.09.04.

А.И. Щепотьев, В.В. Варюхно, Т.И. Кузьменко, Л.В. Бурдюженко

Триботехническая износостойкость газотермических покрытий

Рассмотрено влияние элементоорганических присадок на закономерности изнашивания покрытий. Установлены основные триботехнические процессы, которые обуславливают сопротивление изнашиванию.

A.I. Shchepotjev, V.V. Varukhno, T.I. Kuzmenko, L.V. Burduzhenko

Tribotechnical wear capability of gasometrical covering

The experimental studies of the element-organic influence additive will presented on regularities of covering, are installed main trybotechanical processes, which is a result the resistance covering.