

УДК 620.178.16 (045)

В.О. Краля, канд. техн. наук, доц.
А.М. Хімко, асист.
О.С. Якобчук, асист.

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПЛАЗМОВИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

НАУ, кафедра технологій відновлення авіаційної техніки
 E-mail: witlab@nau.edu.ua

Розглянуто фретингостійкість плазмових газотермічних покриттів ВКНА, ПГ10Н-01, ПС12НВК-01 і молібдену. Дослідження, яке проведено в широкому діапазоні амплітуд і навантажень, дозволяє адекватно вибирати і застосовувати покриття для відновлення вузлів тертя. Виявлено, що зі зміною амплітуди переміщення змінюється інтенсивність зношування покриттів. Визначено область, де відбувається зміна процесів на поверхні тертя з механохімічних на втомно-абразивний та характер зношування злінійного на параболічний. Числове значення цієї області залежить від умов навантаження.

It is analyzed fretting ability of plasma gas-thermal covers: ВКНА, ПГ10Н-01, ПС12НВК-01 and molybdenum. Researches are carried out in a broad band of amplitudes and loadings. It is revealed, that with the magnitude variation of movement intensity of wear of covers varies. There is a fixed area where there is a changeover of processes with friction surfaces, from mechanical-chemical on fatigue-abrasive which changes character of wear with linear on parabolic. Its numerical value depends on requirements of loading. Researches will allow selecting and applying covers to recovery of clusters of abrasion adequately.

Постановка проблеми

На сьогодні у машинобудуванні, виробництві будівельних конструкцій, енергетики, двигунобудуванні, авіакосмічної галузі, широко застосовують газотермічні покриття. За допомогою покриттів для забезпечення календарного ресурсу можна вирішити безліч задач підвищення [1]:

- атмосферостійкості;
- експлуатаційної стійкості;
- ерозійної стійкості;
- хімічної стійкості;
- термостійкості;
- адгезії;
- захисних властивостей;
- зносостійкості деталей, вузлів машин і механізмів.

Нанесення захисних зносостійких покриттів – один із найбільш ефективних засобів боротьби з фретинг-зносом.

Десятки розроблених технологічних методів і велика номенклатура матеріалів дозволяють одержувати покриття, які володіють високою зносостійкістю.

При виробництві й ремонті деталей авіаційної техніки найбільш широко використовують зносостійкі покриття, одержані методами газотермічного напилювання [2].

Один із напрямів виконання захисних покриттів – метод плазмового напилювання. Цей високопродуктивний технологічний метод напилювання дозволяє наносити покриття з широким спектром характеристик, а також застосовувати їх для відновлення розмірів зношених деталей.

Реалізація газотермічних методів нанесення захисних покриттів ефективна лише при правильному виборі матеріалу і відповідності його властивостей технологічним можливостям конкретних методів напилювання.

Однак інформація про властивості порошків, що випускаються, для зносостійких покриттів неповна і суперечлива.

З погляду на те, що поняття “зносостійкість” комплексне, остаточний висновок щодо працездатності газотермічного покриття можуть дати тільки випробування на спеціальних триботехнічних установках, моделюючих тертя реальних трибопар у визначених режимах.

Аналіз досліджень і публікацій

Останнім часом дослідженню плазмових покриттів присвячено безліч літератури.

Так, автори праці [3], модифікуючи параметри напилювання покриттів на основі Al-Co і АН-35, знайшли за допомогою растрової мікроскопії, що обрані методи і режими модифікування поверхні сприяють значному зменшенню зносу, а також підвищенню мікро- і нанотвердості. Однак діапазони працездатності покриттів досліджені не були.

У праці [4] показано застосування плазмових покриттів для різних сталей і сплавів. Автори визначили, що антифрикційні властивості металевих покриттів значно вище, ніж властивості матеріалів, що напиляються.

Для різних умов випробування, змащень і пар тертя зносостійкість підвищується в 1,5–3 рази.

Аналіз антифрикційних властивостей покриттів, наведених у праці [5], показує, що коефіцієнт тертя покриттів менший, ніж напilenого металу чи псевдосплаву, а максимальне припустиме навантаження більше.

У праці [6] показано, що під час дослідження фретингостійкості покриттів на основі нікелю, нанесених плазмовим способом, автори одержали лінійні залежності в діапазоні амплітуд до 150 мкм. Таким чином, необхідне більш досконале вивчення працездатності покриттів для їхнього правильного вибору при відновленні деталей і вузлів літальних апаратів і авіаційних двигунів.

Мета роботи – дослідження зношування газотермічних покриттів, нанесених плазмовим способом, у широкому діапазоні навантажень і амплітуд, а також визначення їх працездатності.

Методика експерименту

Випробування на фретинг-корозію проводилися на установці, яка імітує вібрацію МФК-1 [7] за схемою контакту площина–площина.

Вибір плоского кільцевого контакту і зворотно-обертального руху поверхонь контакту, зумовлений необхідністю контролю нормального навантаження та усунення крайового ефекту.

Сутність методу полягає в тому, що циліндричний рухливий зразок (контрзразок), що стикається торцем з нерухомим циліндричним зразком при заданому навантаженні, приводиться в зворотно-обертальний рух із заданими амплітудою і частотою. Дослідження виконували при постійному навантаженні, що становили 10, 20, 30, 40 МПа та амплітуді, яка змінювалася від 50 до 300 мкм.

Частота коливань залишалася незмінною і дорівнювала 30 Гц. База випробувань становила 500 тис. циклів. Температура зразків на початку експерименту дорівнювала 293 К.

Для напilenня плазмових покриттів використовували циліндричні ролики діаметром 20 мм з титанового сплаву ВТ-22. Контрзразок в усіх випробуваннях виконаний зі сталі 95Х18 із твердістю HRC 45-50 одиниць.

У дослідженнях використовували чотири види газотермічних покриттів – ВКНА, ПГ10Н-01, ПС12НВК-01 та молібден, що наносилися на плазмовій установці УПУ-3Д.

Товщина покриттів становила 600 мкм, після механічної обробки – 500 мкм, включаючи прошарок.

Покриття ВКНА і молібден наносили без прошарку, а покриття ПГ10Н-01 і ПС12НВК-01 наносили на сплав ВТ-22 з прошарком ВКНА для забезпечення кращої адгезії плазмових покриттів з основою.

Дослідження зміни лінійного зносу та інтенсивності зношування покриттів проводили на повітрі при терті без мастильного матеріалу.

Знос нерухомого зразка вимірювали за задану кількість циклів, так визначали зносостійкість досліджуваного матеріалу.

Зміну мікротвердості газотермічних покриттів контролювали за допомогою приладу ПМТ-3.

Фретингостійкість плазмових покриттів

Результати випробувань фретингостійкості плазмових газотермічних покриттів показано на рис. 1.

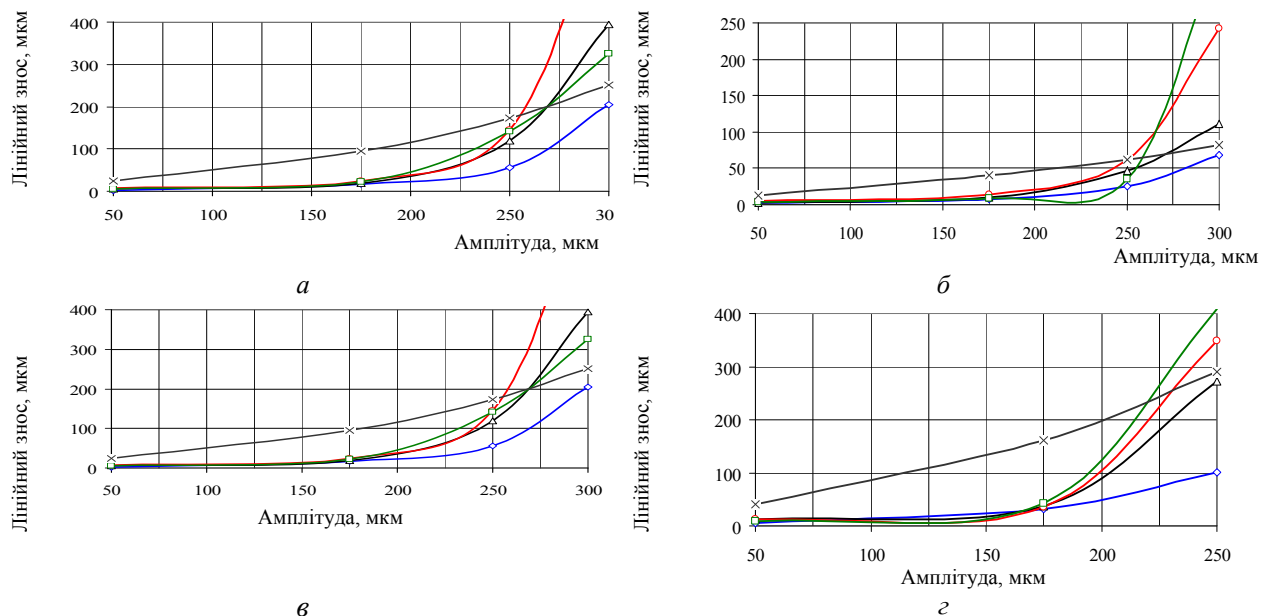


Рис. 1. Зміна лінійного зносу плазмових газотермічних покриттів зі збільшенням амплітуди відносного переміщення в умовах фретинг-корозії:

a – навантаження 10 МПа; *б* – навантаження 20 МПа; *в* – навантаження 30 МПа; *г* – навантаження 40 МПа;

♦ покриття Мо; Δ покриття ВКНА; ○ покриття ПГ10Н-01; □ покриття ПС12НВК-01; ▾ покриття ВТ-22

Дослідженнями встановлено, що при постійній кількості циклів випробувань (500 тис. циклів), незалежно від видів газотермічних покриттів, лінійний знос у діапазоні від 50 до 215 мкм збільшується прямо пропорційно амплітуді переміщення і різко зростає при амплітуді від 200 до 240 мкм.

Швидкість зміни лінійного зносу для різних покриттів неоднакова. Наприклад, при невеликому питомому навантаженні зразків (10 МПа) найбільш чутливим до зміни амплітуди переміщення є покриття із самофлюсуючих порошків ПГ10Н-01 і ВКНА.

Покриття ВКНА в діапазоні амплітуд від 50 до 220 мкм має один з найкращих показників зносостійкості. Характер зношування покриттів в цьому діапазоні наближається до лінійного з плавним збільшенням.

При амплітудах, які перевищують 250 мкм, процес зношування різко змінюється і наближається до параболічного. У цьому діапазоні амплітуд найбільше різко збільшується знос покриття ВКНА.

Приблизно схожий характер зношування покриттів залежно від амплітуди взаємного переміщення спостерігається і при питомому навантаженні 30 МПа.

При помірних і великих навантаженнях 20 і 40 МПа найбільш чутливими покриттями до зміни амплітуди є покриття з порошків ПГ10Н-01 і ПС12НВК-01.

Покриття із самофлюсуючих порошків на нікелевій основі і карбиду вольфраму ПС12НВК-01 при навантаженні 20 МПа має практично лінійний характер зношування до амплітуди 215 – 220 мкм, а після 230 мкм різко збільшується, перевищуючи тим самим знос покриттів ПГ10Н-01 і ВКНА.

Найбільш стабільним і менш чутливим до зміни амплітуди взаємного переміщення є покриття з порошку молібдену. Це покриття має практично лінійний характер, схожий з іншими досліджуваними плазмовими покриттями на всьому діапазоні питомого навантаження до амплітуди 200–250 мкм і злегка збільшується після 250 мкм.

Покриття молібдену показало найбільш кращі параметри зносостійкості при фретинг-корозії в усіх діапазонах амплітуд від 50 до 300 мкм і питомому навантаженні, що змінювалося в діапазоні від 10 до 40 МПа.

При навантаженні 40 МПа випробування плазмових покриттів проводили до амплітуди в 250 мкм, оскільки контрзразок не витримував таких жорстких параметрів випробувань.

Швидке утворення макротріщин матеріалу 95Х18 призводило до випадіння окремих ділянок доріжок тертя контрзразка.

Фрактографія та структура покриттів

Визначення характерних видів, слідів контактної взаємодії покриттів після випробувань на фретинг-знос дозволяє виявити особливості поверхонь руйнування [8], а також визначити ведучий механізм зношування поверхонь.

На рис. 2 показано поверхні доріжок тертя плазмових покриттів і чистого титанового сплаву ВТ-22 після випробувань на фретинг-корозію.

Ретельна фрактографія поверхонь руйнування при фретинг-корозії дозволила виділити три основних типи пошкоджень [9]:

- ямкове руйнування;
- борознисте руйнування від злиття ям;
- макроямкове руйнування.

У загальному випадку ямкове руйнування можна розділити на дві стадії формування ямкового руйнування:

- поява лускатих відшарувань тонких поверхневих шарів;
- поява на окремих ділянках типового ямкового руйнування, що надалі поєднуються в борозни (рис. 2, б, г). Ями мають еліптичну форму. Бічні поверхні ям – типові квазікристалічні з великим ступенем пластичної деформації.

Борознисте руйнування – наслідок злиття ям. Борозни орієнтуються в напрямку мікропереміщень еквідистантно одна іншої.

Перший вид доріжок – перегородки між ямами, які ще не зруйнувалися, і другий – сформована борозна (рис. 2, в), що має гладку поверхню.

Це результат багаторазового впливу часток, які відокремилися в умовах корозійної активності.

Макроямкове руйнування являє собою глибокі руйнування матеріалу і є наслідком утомно-корозійних пошкоджень поверхні.

При терті газотермічних покриттів в умовах фретинг-корозії на поверхні завжди утворюються окисли, за зміною кольору яких можна визначити зміну процесів, що відбуваються в зоні тертя [10].

При терті контрзразка по покриттю ВКНА окисли змінювалися від темно-рудого до світло-рудочервоного кольорів.

При великих амплітудах і навантаженнях окисли темніють і переходять у коричневі.

При амплітудах 300 мкм знос зразків помітно збільшується. Процес тертя йде з виділенням тепла. Чим вище навантаження, тим вище температура в зоні тертя.

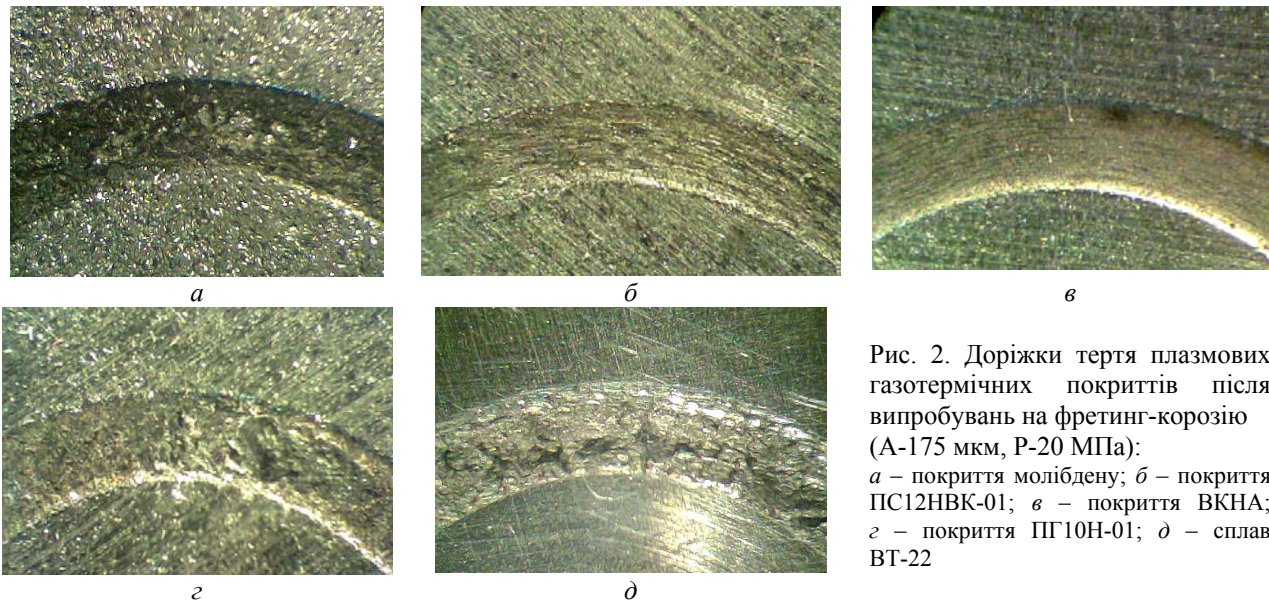


Рис. 2. Доріжки тертя плазмових газотермічних покриттів після випробувань на фретинг-корозію (А-175 мкм, Р-20 МПа): а – покриття молібдену; б – покриття ПС12НВК-01; в – покриття ВКНА; г – покриття ПГ10Н-01; д – сплав ВТ-22

При амплітуді в 300 мкм і навантаженні 10 МПа об'ємна температура зразків становила 298–303 К, при 20 МПа – 303–313 К, при 30 МПа близько 318 К. Окисли при терті покриття ПГ10Н-01 на початковій стадії експерименту являли собою чорні дрібнодисперсні з невеликим включенням металевих часток (контрзразка), які у наступному світлішають і стають світло-рудими. При збільшенні навантаження затягується період припрацювання, про що свідчать окисли.

Так, при 30–40 МПа чорні окисли спостерігаються протягом 100–150 тис. циклів, а при 10–20 МПа менш 100 тис. циклів напрацювання. Покриття ПС12НВК-01 у процесі тертя змінювало окисли від чорних і темно-рудих на початкових стадіях експерименту до світло-сірих і світло-рудих під кінець дослідів. Найбільш сприятливо поводить ся плазмове покриття молібдену. Окисли змінюються від чорних (у процесі припрацювання) до темно-сіро-синього кольору. Інтенсивність появи окислів змінюється.

На початку дослідів спостерігається інтенсивне виділення окислів із зони тертя (процес припрацювання), але вже до 100 тис. циклів кількість окислів за одиницю часу помітно зменшується. Це можна пояснити тим, що в процесі тертя покриття молібдену намазується на контрзразок і відбувається тертя покриття по покриттю. До того ж окисли молібдену являють собою дрібнодисперсний порошок, що в процесі тертя працює як тверде змащення.

При терті контрзразка по титановому сплаву ВТ-22 відбувалося намазування сплаву ВТ-22 на контрзразок унаслідок схильності титана до холодного приварювання, і вже відбувалось тертя сплаву ВТ-22 по сплаву ВТ-22.

На рис. 2, а показано мікроструктури газотермічних покриттів і сплаву ВТ-22 після випробувань на фретинг-корозію зі сталлю 95Х18.

Установлено, що для всіх матеріалів твердість зерна, що утворюють покриття, вище твердості основного матеріалу у вихідному стані.

Структура плазмового покриття ВКНА складається з витягнутого, приплющеного зерна алюмінію і хрому, розподілених у нікелевій основі. Між зернами покриття спостерігаються пори приплющеної й округлої форми.

Пористість покриття становить 8–10%.

Між покриттям і основним матеріалом спостерігаються пори (рис. 3, а).

У деяких місцях покриття практично не ввійшло в зачеплення з основою.

Структура молібденового покриття щільна, складається з витягнутого і округлого зерна молібдену мікротвердістю

$H_{\mu 50} = 2,75\text{--}4,85$ ГПа,

а також ділянок мікротвердістю

$H_{\mu 50} = 16$ ГПа.

Середня пористість становить 3–4 %.

Між покриттям і основою пор не спостерігається, що може свідчити про гарну міцність зчеплення.

Покриття із самофлюсуючого порошку ПГ10Н-01 являє собою розплави часток хрому, кремнію і заліза в нікелевій матриці. Воно практично однофазне, добре проплавлено, ламелі слабо помітні.

Пористість покриття становить 6–8%. Покриття наносили на прошарок ВКНА, що дало гарне заповнення пор між основою і покриттям.

У деяких місцях у покритті спостерігаються великі округлі пори.

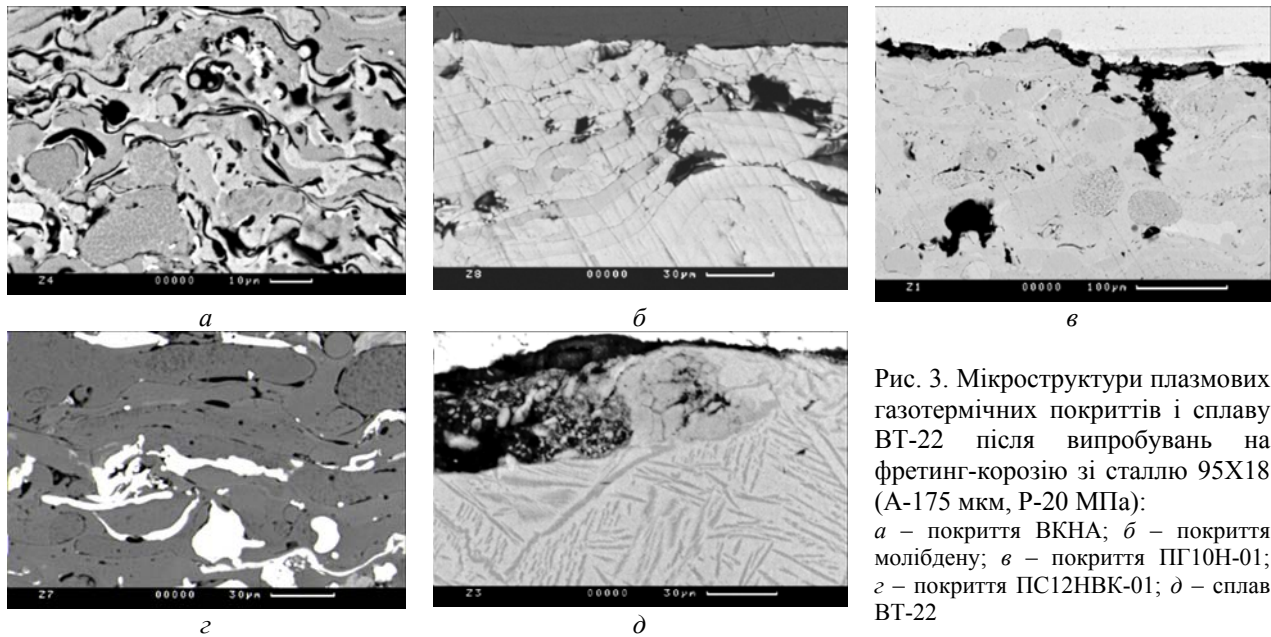


Рис. 3. Мікроструктури плазмових газотермічних покриттів і сплаву VT-22 після випробувань на фретинг-корозію зі сталлю 95X18 (A-175 мкм, P-20 МПа):

a – покриття ВКНА; б – покриття молібдену; в – покриття ПГ10Н-01; д – сплав VT-22

При терті покриття в поверхневому шарі утворювалися досить великі тріщини до 100 мкм (рис. 3, в).

Мікроструктура покриття, напиленого порошком ПС12НВК-01, шарувата, двофазна, добре проплавлена, являє собою частки хрому і карбиду вольфраму в нікелевій основі. У деяких місцях на поверхні основного матеріалу спостерігаються пори, що може погано відобразитися на міцності зчеплення покриття. Пористість покриття становить 5–8%.

Мікротвердість основного матеріалу в глибині сплаву дорівнює

$H_{\mu 50} = 4,3\text{--}4,4$ ГПа,

під покриттям

$H_{\mu 50} = 4,4$ ГПа.

Мікротвердість прошарку у вихідному стані становить

$H_{\mu 50} = 3,8$ ГПа,

у зоні зносу

$H_{\mu 50} = 4,5$ ГПа.

У покритті такі структурні зміни мають мікротвердість:

– світла фаза:

$H_{\mu 50} = 7,1$ ГПа;

$H_{\mu 50} = 7,1$ ГПа після випробувань;

– світла фаза з невеликими виділеннями:

$H_{\mu 50} = 8,1$ ГПа;

$H_{\mu 50} = 8,7$ ГПа після випробувань;

– блискучі частки на основі вольфраму:

$H_{\mu 50} = 13,1$ ГПа;

$H_{\mu 50} = 13,7$ ГПа після випробувань.

Мікротвердість продуктів корозії дорівнює

$H_{\mu 10} = 3,6\text{--}4,7$ ГПа.

Мікроструктуру і зону тертя сплаву VT-22 показано на рис. 3, д.

Поверхня тертя покрита окислами із включеннями контрзразка.

Мікротвердість основного металу в глибині становить на поверхні (глибина 10–15 мкм)

$H_{\mu 50} = 4,5$ ГПа;

$H_{\mu 50} = 4,7$ ГПа.

Твердість невеликих шматків контрзразка та наклепаного титанового сплаву, що впровадився в поверхню та зону тертя, має змінену структуру до $H_{\mu 50} = 7,1$ ГПа,

продукти корозії

$H_{\mu 10} = 3,9\text{--}4,3$ ГПа.

Висновки

1. Зі зміною амплітуди переміщення змінюється інтенсивність зношування покриттів. Визначено область, де відбувається зміна процесів на поверхні тертя з механохімічного на втомно-абразивний, що змінює характер зношування з лінійного на параболічний. Числове значення амплітуди залежить від умов навантаження і дорівнює 200–230 мкм для 10–30 МПа, 170–180 МПа для 40 мкм.

2. Не слід застосовувати плазмові газотермічні покриття при великих питомих навантаженнях та амплітудах в умовах фретинг-корозії, коли зносостійкість титанового сплаву VT-22 більша ніж у покриттів. За цих умов на поверхні тертя зносостійкість визначається втомно-абразивними процесами.

3. Плазмове газотермічне покриття молібдену показало одні з самих стабільних результатів у широкому діапазоні питомих навантажень і амплітуд.

Література

1. *Защитные покрытия в машиностроении: Материалы XXII Всесоюз. сес.* / Отв. ред. К.А. Ющенко. – К.: Наук. думка, 1987. – С. 5–14.
2. *Технологическая инструкция по применению износостойких газотермических покрытий для восстановления деталей авиатехники* / А.Я. Алябьев, В.А. Венедиктов, Г.Н. Гельгар и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 56 с.
3. *Структура и свойства порошковых покрытий, нанесенных высокоскоростной плазменной струей* / А.Д. Погребняк, Ю.А. Кравченко, Д.Л. Алонцева и др. // ФХММ. – Л., 2005. – №5. – С. 507–515.
4. *Катц В.В.* Металлизация распылением. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
5. *Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А.* Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 230 с.
6. *Исследование триботехнических свойств плазменных оксидных покрытий применительно к условиям работы деталей узлов ГТД* / Техн. отчет по НИР / КИИГА; Науч. руководитель Н.Л. Голего. – К., 1990. – 143 с.
7. *ГОСТ 23.211-80.* Методика испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.
8. *Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В.* Фреттинг-коррозия металлов. – К.:Техніка, 1974. – 272 с.
9. *Технологическая инструкция по применению покрытий при ремонте деталей авиационной техники, поврежденных фреттинг-коррозией.* – М.: Воздуш. транспорт, 1980. – С. 15–19.
10. *Физико-химические свойства окислов.* Справ. / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

Стаття надійшла до редакції 16.06.06.