

## Зносостійкість плазмових покриттів при постійній роботі тертя

В. О. Краля, А. М. Хімко, В. М. Бородій

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

*Аналізується зносостійкість плазмових покриттів при постійній роботі тертя. Отримано залежність зносостійкості покриттів у широкому діапазоні умов навантаження. Визначено, що найменш чутливими до умов навантаження є покриття молібдену. Установлено, що зі збільшенням амплітуди переміщення і зменшенням циклічної частоти випробувань зносостійкість покриттів зменшується за рахунок інтенсифікації утомних процесів у їх поверхнях. Наведено порівняльні характеристики покриттів.*

**Ключові слова:** плазмові покриття, робота тертя, утомно-абразивний процес зношування, молібден.

**Вступ.** Для сучасного машинобудування спрацювання деталей у вузлах тертя в основному пов'язано зі зношенням [1]. На даний час у виробництві будівельних конструкцій практично у всіх галузях машинобудування, енергетиці, двигунобудуванні, авіакосмічній та інших галузях нової техніки застосовуються плазмові покриття. За допомогою покриттів можна вирішити наступні задачі: підвищення атмосферостійкості; експлуатаційної стійкості; адгезії; термостійкості; ерозійної стійкості; захисних властивостей і хімічної стійкості для забезпечення календарного ресурсу [2]. Але найбільшою проблемою є підвищення зносостійкості деталей, вузлів машин і механізмів.

Нанесення захисних покриттів є одним із найбільш ефективних методів боротьби зі зношенням. Розроблено і використовуються десятки технологічних методів і великий клас матеріалів, що дозволяє отримувати покриття з високою зносостійкістю. При виробництві і ремонті деталей авіаційної техніки широко використовують зносостійкі покриття, що отримані методами газотермічного напилювання.

На закономірність розвитку процесів зношування впливає цілий ряд факторів: амплітуда переміщення; питома навантаження; частота коливання; форма контакту сполучених деталей та ін. [1]. Зі зміною цих факторів змінюються процеси на контакті тертя, що зумовлює пошкодження поверхонь. Визначення ролі різних факторів та наявність даних про характер протікання процесів у механохімічних матеріалах дозволять науково обґрунтовано вибирати матеріал сполучених поверхонь для виробництва і ремонту деталей та методи боротьби зі зношуванням.

Проблема зносостійкості газотермічних покриттів вивчалася багатьма дослідниками [3–5 та ін.]. Наприклад, в [3] досліджувалася зносостійкість нанесених детонаційним методом напилювання газотермічних покриттів. Такі покриття мають малу пористість і високу міцність зчеплення. Дослідження проводили в різних газових і рідких середовищах. Установлено діапазони працездатності покриттів у залежності від умов їх навантаження.

Дослідження покриттів, нанесених імпульсно-плазмовим методом, розглядалися в роботі [4]. Показано, що нанесені цим методом покриття мають

властивості детонаційного і плазмового способу напилення. Досліджено багато характеристик газотермічних покриттів, у тому числі зносостійкість і міцність зчеплення покриття з підкладкою.

Зміна структури плазмових покриттів досліджувалася також у роботі [5]. Установлено, що в процесі проведення досліджень у зоні тертя змінювалися фізико-механічні властивості покриття, утворювалися нові з'єднання, які відіграють значну роль при терті. Зазначимо, що дослідження при постійній роботі тертя не проводилося, що викликає до них неабиякий інтерес.

**Постановка задачі** – дослідження поведінки зношування плазмових покриттів при постійній роботі тертя та аналіз процесів, що відбуваються на поверхні, при терті в широкому діапазоні умов навантаження.

**Зносостійкість плазмових покриттів.** Експерименти проводили на установці МФК-1, що імітує вібрацію, відповідно до ГОСТ 23.211-80 за схемою контакту площина–площина. Суть методу полягає в тому, що циліндричний рухливий зразок (контрзразок), який стикається торцем із нерухомим циліндричним зразком при заданому тиску, приводиться у зворотньо-обертний рух із заданими амплітудою і частотою. Вимірюється знос нерухомого зразка за задану кількість циклів, за значенням якого визначається зносостійкість досліджуваного матеріалу.

Зразками для напилювання плазмових покриттів служили циліндричні ролики діаметром 20 мм із титанового сплаву ВТ22. Контрзразок у всіх дослідах виготовляли зі сталі 95Х18 твердістю *HRC* 45...50. З'єднання зразків, що випробовувалися, здійснювалося по поверхні, яка представляє собою замкнуте кільце з номінальною площею контакту  $0,5 \text{ см}^2$ , внутрішнім діаметром 11 мм і зовнішнім діаметром 13,6 мм.

Покриття наносили на плазмовій установці УПУ-ЗД. Перед їх нанесенням поверхню шліфували й обробляли піском. Покриття товщиною 600 мкм механічно обробляли до величини 500 мкм, включаючи підшар.

Дослідження з вивчення зміни лінійного зносу й інтенсивності зношування покриттів проводили на повітрі при терті без мастильного матеріалу. Слід зазначити, що перед проведенням дослідів напилене покриття і контрзразок протирали сумішшю спирту з ацетоном, щоб виключити вплив побічних факторів. Попередню обробку зразків не проводили. Із метою підвищення точності і вірогідності результатів дослідження кількість випробуваних зразків складала не менше трьох на одну крапку.

Дослідження зносостійкості при постійній роботі тертя проводили на чотирьох плазмових покриттях (ВКНА, ПГ10Н-01, ПС12НВК-01, Мо) і сплаві ВТ22 при трьох режимах.

1. Амплітуда  $A = 50 \text{ мкм}$ , частота випробувань  $\nu = 30 \text{ Гц}$ , база дослідів  $N = 5 \cdot 10^5$  цикл.

2.  $A = 175 \text{ мкм}$ ,  $\nu = 8,9 \text{ Гц}$ ,  $N = 1,5 \cdot 10^5$  цикл.

3.  $A = 300 \text{ мкм}$ ,  $\nu = 5 \text{ Гц}$ ,  $N = 9 \cdot 10^4$  тис. цикл.

У ході проведення експерименту інші параметри не змінювалися: середня швидкість ковзання  $\nu_{\text{ср}} = 3 \text{ мм/с}$ , що відповідає стандартним випробуванням на фретинг за ГОСТ 23.211-80 при  $A = 50 \text{ мкм}$  і  $\nu = 30 \text{ Гц}$ ; питоме навантаження  $P = 20 \text{ МПа}$ ; середній шлях тертя  $S = 50 \text{ м}$ ;  $T = 293 \text{ К}$ .

На рис. 1 представлено залежності лінійного зносу плазмових газотермічних покриттів і сплаву ВТ22 при постійній роботі тертя при трьох режимах випробувань. Видно, що зі збільшенням амплітуди переміщення і зменшенням частоти коливань (3-й режим) знос газотермічних покриттів різко зростає і перевищує знос титанового сплаву в 1,5–2,5 раза. Цікаво, що за різних режимів випробування інтенсивність зношування плазмових покриттів ВКНА, ПГ10Н-01 і ПС12НВК-01 різна. Найбільш чутливим до зміни режимів є покриття ПГ10Н-01: при 1- і 3-му режимах зносостійкість незначна, при 2-му вона помірна. Покриття ПС12НВК-01 менш чутливе до зміни умов випробувань. На 1- і 2-му режимах характеристики зносостійкості цього покриття найгірші, на 3-му режимі вони середні. Покриття ВКНА займає проміжне положення між покриттями ПГ10Н-01 і ПС12НВК-01. Воно поєднує в собі області руйнування, характерні для цих покриттів.

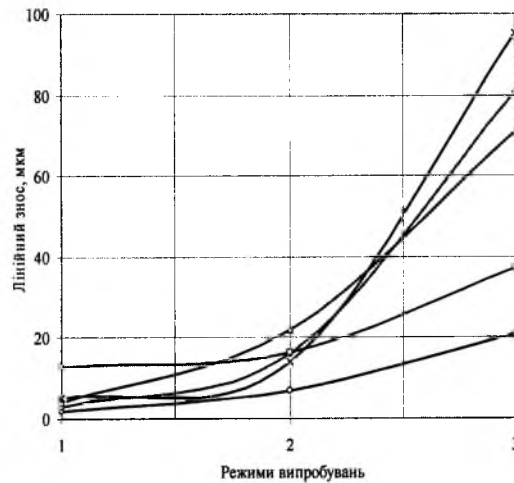


Рис. 1. Зносостійкість плазмових покриттів і сплаву ВТ22 при постійній роботі тертя при трьох режимах випробувань ( $S = 50$  м,  $V_{\text{ср}} = 3$  мм/с,  $P = 20$  МПа,  $T = 293$  К): ○ – Мо; ◇ – ВКНА; × – ПГ10Н-01; △ – ПС12НВК-01; □ – ВТ22.

Найбільш стабільним до умов випробувань виявилось покриття Мо, характер зношення якого подібний до титанового сплаву ВТ22. Зносостійкість покриття Мо в два-три рази вища, ніж титанового сплаву ВТ22, і в два-п'ять раз (3-й режим) більша, аніж інших покриттів.

Зміну зносостійкості плазмових покриттів і сплаву ВТ22 при постійній роботі тертя можна пояснити інтенсифікуванням утомних процесів на поверхнях доріжок тертя, що приводить до утворення тріщин і, як наслідок, випадання цілих окремих структур покриття.

**Фрактографічні дослідження поверхонь покриттів.** Залежність інтенсивності зношування від частоти коливань і амплітуди переміщень можна також пояснити в такий спосіб. Залежність циклічної міцності плазмових покриттів від частоти коливань і амплітуди переміщень зумовлена дією двох конкуруючих факторів [6, 7]: тимчасовим навантаженням у плинні одного циклу і температурою (при збільшенні частоти навантаження температура підвищується).

Оскільки нагрівання зразків при проведенні експерименту було незначним (до 303...308 К), можна з великою часткою ймовірності говорити, що на зносостійкість плазмових покриттів впливає часовий фактор. При зростанні тривалості дії дотичних напружень за один цикл пошкодження покриттів збільшується внаслідок дії утомних процесів на поверхні доріжок тертя. На рис. 2 показано поверхні доріжок тертя плазмових покриттів за різних режимів випробувань. Видно, що зі збільшенням амплітуди переміщень і зменшенням частоти коливань знос зразків значно зростає в результаті активізації на поверхнях тертя утомних процесів, які приводять до випадіння цілих окремих ділянок покриттів. Це підтверджує і рис. 2, *г*, на якому зображено контрзразок після випробувань (3-й режим). Його поверхня покрита розмазаними часточками покриття, що висипалося в процесі тертя.

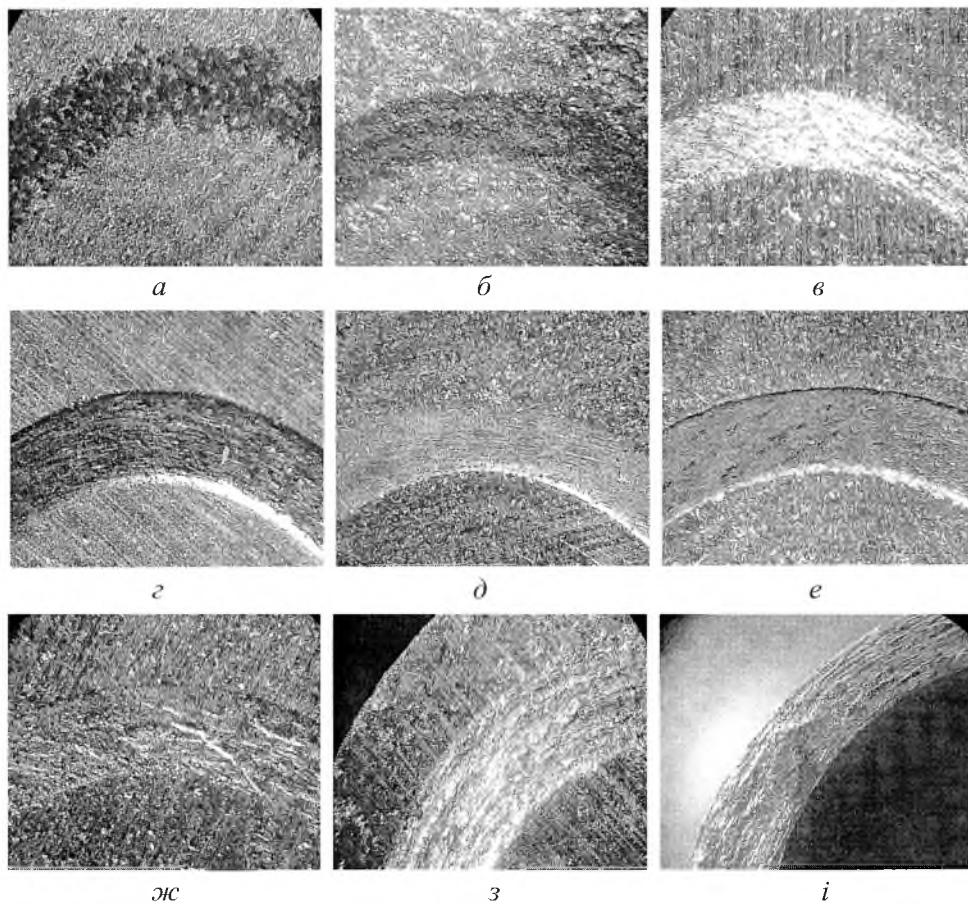


Рис. 2. Поверхні тертя плазмових покриттів і контрзразка при постійній роботі тертя за різних режимів випробувань: *а, б* – покриття молібдену (1- і 3-й режими); *в, г* – покриття ПГ10Н-01 (2- і 3-й режими); *д, е* – покриття ВКНА (1- і 3-й режими); *ж, з* – покриття ПС12НВК-01 (2- і 3-й режими); *і* – контрзразок при терті з покриттям ПС12НВК-01 (3-й режим).

Найбільш явна картина руйнування поверхні спостерігається для покриття ПС12НВК-01 (рис. 2, *з*) при випробуваннях на 2- і 3-му режимах. Збільшується кількість ям, борозенок, наростів, виривів, глибина яких сягає

130 мкм. Поверхня тертя покриття ВКНА гладка з невеликими подряпинами і виривами, що спостерігаються як на 1-му, так і 3-му режимах випробувань.

Така різна картина на поверхнях тертя зумовлена складом покриття. У випадку покриття ПС12НВК-01 тверда фаза WC, що складає 35% складу покриття при випадінні, працює як абразив, внаслідок чого на поверхні з'являються значні вириви і борозенки. Покриття ВКНА, основний склад якого займає Ni, зношується рівномірно, а невеликі борозенки на поверхні, мабуть, утворилися внаслідок оксиду Al, який входить до складу покриття в кількості 11%. Рельєф поверхні покриття ПГ10Н-01 займає проміжне положення між покриттями ПС12НВК-01 і ВКНА і поєднує в собі характерні області, що властиві їм (18% хрому, що входить до складу й утворює на поверхні подібну картину).

Поверхня тертя покриття Мо практично не змінюється на всіх режимах випробувань. На 1-му режимі поверхня тертя носить природний характер, без виривів і подряпин. На 3-му режимі знос покриття злегка збільшується внаслідок випадіння невеликих ділянок – зерен покриття. Мінімальний знос покриття досягається, мабуть, за рахунок розмазування окремих ділянок, що випали, на поверхні контрзразка, що, у свою чергу, створює проміжний шар, який працює як тверде змащення.

У процесі досліджень на поверхнях плазмових покриттів завжди спостерігалися окисли, аналіз яких із великою часткою ймовірності дозволив визначити ведучі механізми зношування [8]. Окисли на поверхні тертя покриття Мо однорідні, дрібнодисперсні (< 1 мкм). Колір у процесі тертя змінювався від чорно-фіолетового з червоними плямами, що чергуються (2-й режим), до чорно-червоного (3-й режим). Механізм зношування пари тертя змінювався від механохімічного (окисного на 1-му режимі) до утомно-абразивного (3-й режим). При терті одночасно має місце кілька процесів, але тільки один із них є ведучим [1].

При терті плазмових покриттів ВКНА, ПГ10Н-01, ПС12НВК-01 також відбувається перехід від окисного процесу до утомно-абразивного. Утомно-абразивні процеси активізуються значно раніше, ніж при терті молибдену. Причиною цього може бути утворення дисульфиду молибдену на поверхнях тертя, що працює як тверде змащення.

У процесі досліджень встановлено, що зі зміною частоти коливань і амплітуди переміщення незначно змінюється коефіцієнт тертя. Так, сталий коефіцієнт тертя, що для покриття молибдену на 1-му режимі дорівнює 0,32...0,40, збільшується до 0,45...0,50 на 3-му режимі випробувань.

У таблиці представлено зміни сталого коефіцієнта тертя в залежності від режиму випробувань. Із даних таблиці видно, що зі збільшенням амплітуди переміщення і зменшенням частоти коливань сталий коефіцієнт тертя досліджуваних покриттів і сплаву ВТ22 зростає. Найбільший коефіцієнт тертя має покриття ПС12НВК-01 внаслідок дії абразивних процесів на поверхнях тертя. Для сплаву ВТ22 також спостерігається високий коефіцієнт тертя, що пояснюється його схильністю до холодного схоплювання [9]. Відбувається перенесення сплаву на контрзразок, і коефіцієнт тертя наближається до пари тертя ВТ22 по ВТ22. Має місце постійне перенесення титанового сплаву на контрзразок і назад.

## Коефіцієнти тертя плазмових покриттів при постійній роботі тертя

Покриття	1-й режим	2-й режим	3-й режим
ВТ22	0,45...0,48	0,50...0,55	0,50...0,61
ВКНА	0,30...0,33	0,33...0,35	0,50...0,60
ПГ10Н-01	0,34...0,35	0,42...0,45	0,55...0,57
ПС12НВК-01	0,40...0,45	0,50...0,55	0,60...0,66
Мо	0,32...0,40	0,40...0,50	0,45...0,50

**Висновки**

1. При збільшенні амплітуди переміщень і зменшенні частоти коливань знос плазмових покриттів при постійній роботі тертя значно зростає внаслідок інтенсифікації утомних процесів на поверхні тертя. Характер зношування покриттів ВКНА, ПГ10Н-01 і ПС12НВК-01 наближається до параболічного, а молібдену – до лінійного з плавним зростанням.

2. Утомні процеси активізуються на поверхні тертя в результаті дії тимчасового фактора. Чим більше часу витрачається на один цикл, тим більша роль утомно-абразивних процесів при терті зразків.

3. Найбільш стабільним і найменш чутливим до зміни умов випробування (амплітуда переміщень та частота коливань) є плазмове покриття молібдену.

**Резюме**

Анализируется износостойкость плазменных покрытий при постоянной работе трения. Получены зависимости износостойкости покрытий в широком диапазоне условий нагружения. Определено, что наименее чувствительным к условиям нагружения является покрытие молибдена. Установлено, что с увеличением амплитуды перемещения и уменьшением частоты испытания износостойкость покрытий снижается за счет интенсификации усталостных процессов в их поверхностях. Приведены сравнительные характеристики покрытий.

1. *Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.* Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: Техніка. – 1974. – 272 с.
2. *Защитные покрытия в машиностроении: Тр. XXII Всесоюз. сессии.* – Киев: Наук. думка, 1987. – С. 5 – 14.
3. *Зверев А. И., Шариквер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
4. *Исследования работоспособности защитных покрытий и упрочняющих технологий для восстановления рельсов механизации крыла самолета // Отчет по НИР № 133Х-92 за IV кв.* – Киев: КИИГА, 1992. – 44 с.
5. *Похмурський В. І., Калахан О. С., Завалій І. Ю. та ін.* Абразивний знос плазмових покриттів різної структури на титановому сплаві // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 4. – С. 63 – 69.

6. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
7. *Троценко В. Т., Сосновский Л. А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. В 2 ч. – Киев: Наук. думка, 1987. – 1303 с.
8. *Самсонов Г. В., Борисова А. Л., Жидкова Т. Г. и др.* Физико-химические свойства окислов. Справочник. В 2 ч. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
9. *Горынин И. В., Чечулин Б. Б.* Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

Поступила 11. 12. 2006