

УДК 620.178.16 (045)

А.М. Хімко, к.т.н., доц.
В.О. Краля, к.т.н., проф.
О.С. Якобчук, старш. викл.
В.М. Бородій, старш. викл.

АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ТА ЇХ ВИБІР ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Виконано аналіз зносостійкості газотермічних покриттів, що працюють в умовах фретинг-корозії, які нанесені плазмовим, детонаційним та імпульсно-плазмовим способами. До вибору покриттів для відновлення деталей авіаційної техніки необхідно приступати комплексно, аналізуючи не тільки зносостійкість, а й інші критерії, які характеризують експлуатаційні властивості покриттів.

It was made the analysis of wear-resistance of gas-thermal coating which were coated by plasma, detonation and impulse-plasma methods & working in the conditions of fretting-corrosion. For the choice of coating at renewal of elements of aviation technique, it is necessary to make complex analyses of the wear-resistance and other criteria which characterize operating properties of coating.

Постановка проблеми

Газотермічні методи напилення дозволяють отримати більш високі значення температур і густини теплового потоку на оброблюваному виробі порівняно з дуговими методами напилення, хоча й поступаються променевим за концентрацією енергії, але значно дешевші і доступніші щодо їх технічного впровадження [1].

Досвід показує, що газотермічне напилення можна у багатьох випадках застосовувати разом з такими видами, як лазерне і електронно-променеве, забезпечуючи високі техніко-економічні показники процесу.

Регулюючи температурно-швидкісні режими поверхневого нагріву й охолодження, а також застосовуючи різні гази, можна змінювати структурно-фазовий стан поверхні, створюючи оптимальний набір мікроструктур, що забезпечують високі механічні властивості.

Газотермічні покриття наносять:

- в авіаційній промисловості на з'єднання, лопатки турбіни і компресора реактивного двигуна, на цапфи і шасі, несучі конструкції і гідроелементи;
- у машинобудуванні на прес-форми для лиття під тиском, рознімні та нерознімні матриці для пресування, індуктори для паяння, напрямні верстатів, втулки ущільнень, шнеки, колінчасті вали, шворні, поршні та циліндри двигунів;
- в енергетиці на різні вузли генераторів і паливних елементів, на теплоізоляцію теплонапружених вузлів;
- у металургії на дросельні заслінки і фурми доменних печей, вогнетриви, тиглі для плавки;
- у хімічній промисловості на клапани, сідла клапанів, крильчатки й осі насосів, втулки, кільця, деталі конденсаторів-холодильників;

– у нафтовій і вугільній промисловостях на робочі колеса, втулки й інші деталі бурових насосів, торці колонкових труб, ковші екскаваторів і транспортерів. За допомогою покриттів можна розв'язати безліч завдань, але найважливіше з них – підвищення зносостійкості деталей, вузлів машин і механізмів. Нанесення захисних зносостійких покриттів – один з найбільш ефективних засобів боротьби з фретинг-зносом. Натепер розроблено і використовуються десятки технологічних методів і велика номенклатура матеріалів, що дозволяють одержувати покриття, які мають високу зносостійкість.

Особливий інтерес становить плазмове напилення, завдяки якому можна досягти досить високої міцності зчеплення, прийнятної пористості покриття та високих експлуатаційних властивостей.

Аналіз досліджень та публікацій

Технологічний процес плазмового напилення дозволяє не тільки наносити різні покриття, але й виготовляти вироби, що складаються з одного або декількох напилених матеріалів або шарів [2]. Цей спосіб особливо перспективний при дрібносерійному виробництві складно-профільних прес-форм для обробки пластмас з розвиненою геометрією поверхні (меблі, авто-фурнітура, дитячі іграшки, взуттєві підошви, медичні протези, художні вироби та ін.) [3].

Плазмове газоповітряне напилення на навколзовукових швидкостях дозволяє одержувати алюмокерамічні покриття з поліпшеними експлуатаційними властивостями [4]. При цьому фракційний склад алюмінієвого і керамічного порошоків, параметри їх введення в плазмовий струмінь вибирають так, щоб максимально знизити у польоті

дроблення наплавлених частинок, а також підвищити зіткнення і коагуляцію алюмінієвих частинок з керамічними. При напиленні формується щільне з хорошим зчепленням покриття. Завдяки наявності частинок кераміки в м'якій матриці алюмінію багато разів підвищується механічна міцність і зносостійкість покриття. Таке покриття забезпечує більш ніж двократне поліпшення корозійної стійкості порівняно з алюмінієвими, одержаними металізацією електродуги.

Технологію надзвукового нанесення алюмокерамічних покриттів використовують для виготовлення каталізаторів та труб для комплексного очищення відпрацьованих автомобільних газів [5].

У праці [6], модифікуючи параметри напилювання покриттів на основі Al-Co і AN-35, автори за допомогою растрової мікроскопії виявили, що обрані методи і режими модифікування поверхні сприяють значному зменшенню зносу та підвищенню мікро- і нанотвердості.

Добрі результати дає нанесення бронзових покриттів [7]. Деталі автогідропідійомників, виконані зі сталей марок 35 і 45, напилювали порошком ПГ-19М-01 (основа – мідь, алюміній – 9,5 %, залізо – до 4,0 %). Товщина напиленого покриття становила 1,5 – 1,8 мм. За цією технологією вдалося без зниження експлуатаційних характеристик вузлів тертя досягти істотної економії кольорових металів.

У праці [8] показано застосування плазмових покриттів для різних сталей і сплавів. Автори визначили, що антифрикційні властивості металевих покриттів значно вищі, ніж властивості напилюваних матеріалів. Для різних умов випробування, змащень і пар тертя зносостійкість підвищується в 1,5 – 3 рази.

Аналіз антифрикційних властивостей покриттів [9] показує, що коефіцієнт тертя покриттів менший, ніж напилювального металу чи псевдосплаву, а максимальне допустиме навантаження більше.

Останнім часом широко застосовують технологію плазмового зміцнення. Вона відрізняється від інших способів поверхневої термічної обробки відносно простотою і невисокою вартістю технологічного устаткування, не потребує додаткових охолоджувальних середовищ, легко піддається механізації і автоматизації. Правильно вибрані режими обробки забезпечують високі експлуатаційні характеристики і тріщиностійкість виробів.

Для плазмового зміцнення свердел зі сталі Р6М5 використовують азотний плазмовий струмінь [10]. У результаті одержують зміцнений шар глибиною 1,0–1,5 мм. Експлуатаційна стійкість таких свердел збільшується в 1,5–2 рази, а гартування різальних кромки кінцевих фрез із сталі Р18 дозволив збільшити їх стійкість в 1,3–1,5 рази.

Автори [10] запропонували технологію плазмової обробки виробів після наплавлення. Технологія передбачає наплавлення порошковим дротом ПП-НП-25Х5ФМС під флюсом АН-20, механічну обробку і зміцнення аргоною плазмою. Комплексна технологія зміцнення валків дозволяє прокотити до 100 тис. т металу, що в три рази перевищує кількість металу, при експлуатації валів, наплавлених за тією ж технологією, але не зміцнених плазмою.

У праці [4] як ефективний спосіб підвищення зносостійкості колісних пар запропонована технологія плазмового зміцнення. За оптимальних режимів локальної плазмової термообробки зношування зміцнених плазмою колісних пар рухомого складу порівняно із серійними знижується в 2,5–3 рази.

Мета роботи полягає в аналізованні зносостійкості газотермічних покриттів, які були нанесені плазмовим, детонаційним та імпульсно-плазмовим методами, і виборі покриттів для відновлення деталей авіаційної техніки.

Методика експерименту

Ураховуючи те, що одним з основних видів зношування деталей авіаційної техніки є фретинг-знос, то аналізувати покриття будемо з фретингостійкості.

Випробування на фретинг-корозію проводили на установці, яка імітує вібрацію МФК-1 (ГОСТ 23.211–80) за схемою контакту площина-площина. Вибір плаского кільцевого контакту і зворотно-обертального руху поверхонь контакту обумовлено необхідністю контролю нормально-го навантаження та усунення крайового ефекту.

Сутність методу полягає в тому, що циліндричний рухомий зразок (контрзразок), що стикається торцем з нерухомим циліндричним зразком при заданому навантаженні, приводиться у зворотно-обертальний рух із заданими амплітудою і частотою.

Аналізуємо дослідження, які виконували за навантаження 20 МПа та різних амплітуд взаємопереміщень контрзразків. Частота коливань залишалася незмінною і становила 30 Гц. База випробувань становила 500 тис. циклів. Температура зразків дорівнювала 293К.

Дослідження з вивчення зміни лінійного зносу та інтенсивності зношування покриттів проводили на повітрі в умовах тертя без мастильного матеріалу. Вимірювали знос нерухомого зразка за задану кількість циклів, значення якого визначає зносостійкість досліджуваного матеріалу.

Аналіз фретингостійкості газотермічних покриттів та їх вибір для відновлення деталей

Вибір якнайкращого варіанта для відновлення деталей авіаційної техніки завжди пов'язаний з компромісними рішеннями, які називають оптимальними. При цьому під оптимальним розуміють рішення, що мінімізує або максимізує деякий критерій за заданої системи обмежень. Критерій, будучи показником операції, має відповідати меті, бути чутливим до досліджуваних параметрів і, по можливості, простим. Бажано також, щоб критерій був єдиним; у разі потреби оптимізації декількох параметрів з них зазвичай вибирають найважливіший, а інші переводять в обмеження [11].

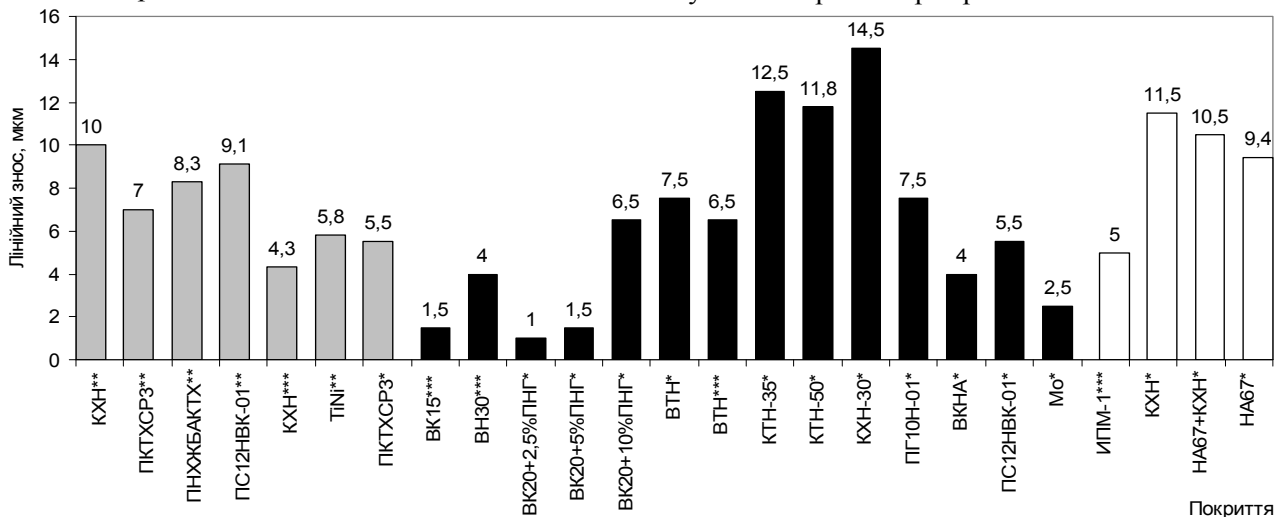
Оптимізація щодо матеріалу зводиться до вибору кращого варіанта із заздалегідь підготовленого переліку марок, що задовольняють поставлені вимоги.

Порівняльна оцінка матеріалів повинна бути орієнтована на класифікацію матеріалів за їх призначенням. До оцінних показників слід віднести вартість матеріалів у взаємозв'язку з їх фізико-механічними властивостями. З-поміж останніх вибираються визначальні показники, що впливають на працездатність деталі.

Порівняльна оцінка зазвичай ґрунтується на зіставленні кількісного рівня відповідних показників, узятих з літературних джерел. Але таке порівняння не може повною мірою визначити доцільність використання того або іншого матеріалу, оскільки вказані показники (наприклад, зносостійкість) не випробовували на реальних контртілах і вмовах навантаження. Разом з тим така оцінна інформація не є вичерпною.

Порівняльний аналіз фретингостійкості газотермічних покриттів, які використовуються для відновлення деталей авіаційної техніки, узятий з літературних джерел, показано на рисунку [12–16]. Покриття наносилися різними способами: плазмовим, детонаційним та імпульсно-плазмовим, що не дозволяє виконати повне порівняння зносостійкості всіх напилених покриттів. До того ж для випробування на фретингостійкість контртіло використали однойменні покриття, а не матеріал із реального вузла зношування. Якщо в процесі експлуатації передбачуваних матеріалів можливі зміни їх властивостей, то треба передусім оцінити ці зміни за відповідною залежністю.

Найбільшу фретингостійкість мали покриття групи ВК (ВК15, ВК20). Однокарбідні сплави цієї серії найбільш в'язкі та міцні, вони добре протистоять ударним і вібраційним навантаженням. Проте їх слід з обережністю застосовувати для відновлення зношених деталей. Будучи дуже твердими (13,5–14,5 ГПа), сплави ВК значною мірою зношують контртіла пар тертя.



Аналіз фретингостійкості зносостійких газотермічних покриттів, які використовуються для відновлення деталей авіаційної техніки ($P = 20$ МПа, $v = 30$ Гц, $T = 293$ К, $N = 500$ тис. циклів, середовище – повітря, пари тертя однакові):

□ 100 мкм ■ 125 мкм □ 200 мкм

* – покриття, нанесені плазмово;

** – покриття, нанесені імпульсно-плазмовим способом;

*** – покриття, нанесені детонацією

Найменшу фретингостійкість, як показав аналіз, мають покриття КХН і КТН. Структура цих покриттів є гетерогенним композиційним матеріалом, що складається з зерен Cr_2C_3 для КХН і TiC для КТН, хаотично розподілених в нікелевій матриці. У процесі тертя під впливом виниклих у поверхневому шарі напружень тверді вкраплення викиркуються.

Невелике зниження зносу покриттів КТН пояснюється тим, що, окрім TiC і Ni , в напиленому шарі містяться інтерметалічні сполуки TiN , TiN_3 і подвійний карбід $(\text{TiN})_6\text{C}$, утворення яких є наслідком взаємодії карбиду титану і нікелю в процесі напилення. Зниження зносостійкості покриття зі зменшенням умісту в композиції плакованого металу зумовлено більш інтенсивним дробленням частинок TiC у процесі напилення під дією теплової і динамічної взаємодії плазми.

З аналізу виходить, що покриття молибдену є оптимальним для відновлення деталей авіаційної техніки. Висока міцність зчеплення з поверхнею, висока енергія міжатомного зв'язку ($E = 32 \cdot 10^4$ МПа) і, як наслідок, висока мікропластичність, що позитивно позначається на демпфувальній здатності покриття і досить високій фретингостійкості. До того ж при напиленні покриття молибдену він взаємодіє з киснем і азотом, утворюючи тим самим нітридооксиди молибдену, які виявляють підвищену мікротвердість (до 12 ГПа) [16]. Гетерогенна структура покриття молибдену, з м'якою матрицею і твердими вкрапленнями, які добре проплавлені між собою, сприятливо позначається на його фретингостійкості.

Вибираючи метод нанесення покриття, необхідно враховувати умови роботи відновлюваної деталі. Залежно від середовища, умов навантаження, типу тертя та інших чинників вибирають газополуменевий, імпульсно-плазмовий, плазмовий або детонаційний методи напилення.

Висновки

1. Відновлення деталей авіаційної техніки газотермічними покриттями ефективно лише в разі правильного вибору матеріалу з контртілом і відповідності його властивостей технологічним можливостям конкретних методів напилювання.
2. Найбільш оптимальним покриттям (серед досліджених матеріалів) для відновлення деталей авіаційної техніки є молибден.

Література

1. *Лященко Г.И* Плазменное упрочнение и напыление – К.: Екотехнологія, 2003. – 64 с.
2. *Соколов Ю.В., Коган Г.В.* Технологические аспекты процесса изготовления матриц пресс-форм напылением и пути его совершенствования. – М.: БелНИИ ИНТИ, 1990. – 28 с.
3. *Мякота С.И., Поляков С.П., Борисов Ю.С.* Изготовление корковых изделий из сплавов системы Cu-Al-Fe методом плазменного напыления // Автоматическая сварка. – 1999. – № 7. – С. 37–43.
4. *Петров С.В., Сааков А.Г.* Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. – К.: ТОПАС, 2000. – 220 с.
5. *Сааков А.Г., Петров С.В.* Катализатор комплексной очистки отработанных автомобильных газов // Мир техники и технологий. – 2002. – № 8. – С. 52–53.
6. *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.*
7. *Галатин Р.Р., Корж В.Н.* Опыт повышения эффективности изготовления узлов трения путем плазменного напыления покрытий из бронзы // Автоматическая сварка. – 1996. – № 1. – С. 58–59.
8. *Катц В.В.* Металлизация распылением. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
9. *Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А.* Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 230 с.
10. *Плазменное поверхностное упрочнение / А.К. Лещинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – К.: Техніка, 1990. – 110 с.*
11. *Зоткин В.Е.* Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 264 с.
12. *Технологические рекомендации по применению износостойких покрытий для восстановления деталей ГТД Д-30 и дефлектора закрылков самолета Ил-76: отчет по НИР / КИИГА; науч. рук. Назаренко П.В. – К.; 1984. – 32 с. – № 482-В83.*
13. *Выполнить исследования работоспособности защитных покрытий и упрочняющих технологий для восстановления рельсов механизации крыла самолета: отчет по НИР / КИИГА; науч. рук. Назаренко П.В. – К., 1992. – 44 с. – № 133Х-92.*
14. *Алябьев А.Я., Духота А. И.* Влияние условий виброконтального нагружения на изнашивание титановых сплавов при фреттинг-коррозии // Трение и износ. – К., 1982. – Т. III, №5. – С. 821–826.
15. *Краля В.А., Морозов П.Л., Постовит А.Р.* Влияние пластичных смазок на износостойкость конструкционных материалов при микроперемещениях // Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей: тез. докл. VII Всесоюз. науч. конф. – К., 26–28 мая 1989. – С. 69.
16. *Краля В.О., Хімко А.М., Якобчук А.Є.* Фретингостійкість плазмових покриттів // Вісн. НАУ. – 2006. – № 4. – С. 108–113.

