

## СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.891

В.В. Щепетов, д-р техн. наук, проф.,  
Є.Ю. Більчук, асп.**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДЕТОНАЦІЙНИХ ЛЕГОВАНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ Fe-Mn**

*Наведено порівняльні результати експериментальних досліджень детонаційних покриттів при підвищених температурах в умовах повітряного середовища.*

Успіхи фізики твердого тіла та поверхневої міцності, досягнуті в квантовомеханічному описі властивостей матеріалу, зробили наочною точку зору, відповідно до якої механічні характеристики металів визначаються будовою атомів даного елемента і знаходяться в залежності від енергії міжатомних зв'язків. Одним з непрямих проявів цієї енергії є температура плавлення.

Однак стійка реалізація в процесі тертя універсального явища структурної пристосованості ґрунтується на комплексі властивостей матеріалів і середовищ триботехнічної системи. Одним з напрямків досягнення вказаного явища є створення детонаційно-газовим методом зносостійких покриттів на основі багатокомпонентних порошкових сумішей шляхом гетерогенізації і термодифузійного насичення початкової сировини легуючими елементами. Вибір як початкової сировини порошку заліза обумовлений низькою вартістю, недефіцитністю і достатньою поширеністю цього матеріалу, здатністю його до багатокомпонентного легування [1].

Усі легуючі добавки залежно від їхнього внеску в процеси зміцнення поділяють на елементи, які входять до складу матриці і здійснюють твердорозчинне зміцнення (Cr, Co та ін.), елементи, які входять до складу фаз, що зміцнюють утворення дисперсних частин тугоплавких з'єднань (Al, Nb та ін.), і активні елементи, що істотно покращують характеристики в'язкості руйнації і пластичності (N, B). Активні елементи, внаслідок великої різниці розмірів своїх атомів від атомів матриці, сегрегуються на межах зерен, заповнюючи вакансії і знижуючи зернограничну дифузію [2].

Введення 1,6 % Cr, 11 % Mn дозволило зазначити високу техніко-економічну доцільність використання даних покриттів для заміни нікелевих. Це досягається за рахунок того, що марганець має вищу за нікель хімічну активність стосовно кисню, азоту, вуглецю та існує велика можливість переходу його в карбідні і нітридні фази навіть при наявності в складі композицій сильних нітридо- або карбідоутворюючих елементів, що сприяє активному утворенню зміцнюючих фаз [3]. Крім того, при концентраціях до 15 % Mn зменшує на відміну від Ni енергію дефектів пакування в аустенитній структурі, чим обумовлює більш високу зміцненість системи Cr-Mn. Застосування марганцю також сприяє зменшенню коефіцієнта дифузії заліза в аустеніті, що безумовно, сприятливо впливає на жаростійкість.

Введення алюмінію, по-перше, значно зміцнює твердий розчин, вносячи внесок у твердорозчинне зміцнення, по-друге, його основне призначення в тому, щоб при взаємодії з матеріалом основи утворювати зміцнюючі фази, забезпечуючи тим самим дисперсне зміцнення. На думку автора, алюміній вигідно відрізняється тим, що активно сприяє утворенню оксидних плівок, які мають механічну суцільність і низьку дифузійну проникність.

Легування бором обумовлено створенням важливого і великого класу неорганічних з'єднань, що відрізняються значною твердістю, тугоплавкістю, високою хімічною стійкістю. Відповідно до відомих теоретичних уявлень бориди ефективно підвищують поверхневу міцність і зносостійкість, роблячи вагомий внесок у дисперсне зміцнення. Основні закономірності фізико-механічних властивостей металоподобних з'єднань бора сформульовані в

роботах [4; 5]. Внаслідок різних розмірів атомів і низької розчинності в матеріалі матричної фази бор сегрегує на зернограничних вакансіях, знижуючи швидкість протікання дифузійних перетворень на межах зерен. При цьому має місце не тільки сегрегація бора в атомарній формі, але й утворення боридів. За даними експерименту (рис. 1), раціональний вміст легуючих елементів складає 8 % Al та 6 % В.

Отже, раціональне легування елементами специфічно вплинуло на фізико-хімічні властивості системи Fe-Mn. Але питання, пов'язані з впливом температури як важливого експлуатаційного чинника на вказані покриття, вимагають детального підходу.

Дослідження впливу температури виконувалися на машині тертя М-22ПВ, розробленій в Інституті проблем матеріалознавства Національної академії наук України, по торцевій схемі тертя, при коефіцієнті взаємного перекриття, що дорівнює одиниці та постійних значеннях навантаження 5 МПа і швидкості ковзання 0,5 м/с. Підвищення робочої температури зразків здійснювалося за допомогою малогабаритного електричного нагрівача і фіксувалося автоматично. Спостереження змін фазового складу поверхні в процесі тертя проводилися методом рентгенографії на установці УРС-50И в Сі-випромінюванні. При цьому, по аналогічним програмам проводилися випробування покриттів на основі нікелю і карбиду вольфраму. У результаті були отримані функціональні залежності інтенсивності зношування і коефіцієнтів тертя від температури.

Як видно з рис. 2, детонаційні покриття на основі заліза показали допустиму зносостійкість у ході випробування. При цьому збільшення температури практично не погіршує трибо-технічних характеристик зазначеного покриття внаслідок інтенсивного утворення на поверхнях тертя структур з високими антифрикційними властивостями. При примусовому підігріві спостерігається посилене взаємодія з киснем повітря поверхні тертя, активованої пластичною деформацією. У результаті цього утворюються рівномірно розподілені по поверхні тертя плівки вторинних структур. Природа утворення означених плівок залежить від умов тертя, матеріалу пари, наявності та складу середовища в зоні контакту. Так, при терті в нормальних атмосферних умовах на поверхні створюються тонкі оксидні плівки [5]. За даними хімічного і фазового аналізу відзначається збільшення ділянок переважно покритих суцільною плівкою  $Mn_5O_4$ .

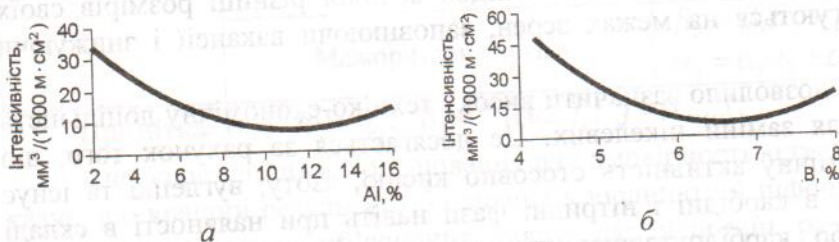


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування від вмісту алюмінію (а) і бору (б)

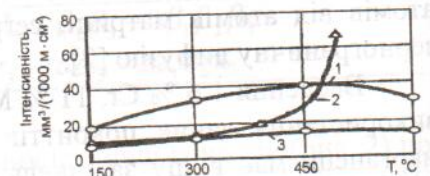


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування від температури: 1 – покриття на основі Fe; 2 – покриття твердого сплаву ВК15; 3 – покриття на основі Ni

Подальше підвищення температури зразків не впливає на вид зносу, спостерігається стійкий процес нормального механохімічного зношування. При цьому низькі значення зносу і коефіцієнта тертя залежать від роботи тертя, що у даному випадку визначається механічними властивостями оксидних плівок, зв'язком їх з основним матеріалом і спроможністю до диспергування. Стехіометричний склад оксидних плівок, що утворюються в процесі тертя в заданих умовах випробування, являє собою високотемпературну модифікацію дрібнодисперсної суміші оксидів  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Mn_5O_4$ , шпинелі  $MnCr_2O_4$  і  $FeMnO_2$  та борного ангідриду  $B_2O_3$ .

За даними фазового аналізу встановлено стійкість складу детонаційних легуваних покриттів системи Fe-Mn як до, так і після випробування. У процесі дифузійного насичення в об'ємі однієї частинки відбувається селективна взаємодія, яка залежить від термодинамічних і дифузійних характеристик, між елементами, які входять до складу порошку, й елементами, що

дифундують (бором і алюмінієм). Так, при дифузійному насиченні порошку заліза, хрому, марганцю спільно бором і алюмінієм кожна частинка являє собою конгломерат з алюмінідів і боридних фаз.

Отже, зносостійкість детонаційних покриттів системи Fe-Mn при високих температурах обумовлена як характеристиками металевих фаз напилуваного прошарку, так і властивостями оксидних плівок, які утворюються. Це у свою чергу, активно перешкоджає процесам контактного скріплення, захищаючи від тертя основний матеріал покриття, і визначає високі антифрикційні характеристики трибопари.

Проведені випробування детонаційних покриттів на основі заліза в умовах повітряного середовища показали, що залежно від температури спостерігається перехід від механохімічного зношування до теплового, а від теплового – знову до високотемпературного механохімічного. Цей перехід обумовлюється, головним чином, значенням коефіцієнта дифузії, що залежить від температури. У роботі [6] підтверджується, що основним механізмом, який веде до аномального посилення процесів дифузії, є дислокаційний.

Умови тертя, що обумовлюють тепловий знос, сприяють прояву скріплення, оскільки збільшується пластичність і полегшується можливість контакту поверхонь тертя, що є необхідною умовою для прояву скріплення. Інтенсивність процесів теплового зношування в повітряному середовищі більша, ніж інтенсивність механохімічного зношування через те, що в умовах підвищених температур у зоні контакту внаслідок високоенергетичних впливів на активованих поверхнях тертя має місце твердофазна хімічна взаємодія, яка призводить до утворення плівок вторинних структур. Зазначені структури, в умовах механохімічного зношування являють собою щільні і суцільні оксидні плівки, які перешкоджають розвитку процесів контактного скріплення, у результаті чого зменшується інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя. Коефіцієнт тертя знаходиться в діапазоні 0,35–0,45.

Для покриттів із твердого сплаву BK15 при температурі 520 °С починається скріплення, тому що збільшення температури викликає інтенсивне окислювання карбіду вольфраму і розм'якшення кобальтової зв'язки (рис. 3, б). Отже, різке зростання енергії термічної активації обумовлює зниження триботехнічних властивостей покриття. При цьому активно розвивається скріплення, що веде до катастрофічного процесу пошкоджуваності. Дана обставина обмежує галузь застосування покриттів із твердого сплаву на основі вольфраму BK15 при підвищених температурах у повітряному середовищі. Покриття на основі нікелю мають вищі триботехнічні характеристики, ніж на основі заліза (рис. 3, в), тому що в інтервалі температур 450–500 °С відбувається утворення оксиду  $Fe_3O_4$ , більш пухкого і менш щільного, ніж  $\gamma-Fe_2O_3$ . Це підтверджується рентгенофазовим аналізом.



Рис. 3. Поверхня тертя після випробувань при температурі 550 °С (x320):

а – детонаційне покриття на основі заліза; б – твердий сплав BK15; в – детонаційне покриття на основі нікелю

Випробування детонаційних покриттів у повітряному середовищі при підвищених температурах показали високі зносостійкі властивості безнікелевого покриття. Отже, досліджувані детонаційні покриття на основі заліза, легованого Mn-Cr-Al-B, можуть бути рекомендовані для практичного використання у вузлах тертя, які працюють при підвищених температурах в окислювальному середовищі, замість сплавів на основі нікелю.

## Список літератури

1. Мартин Д., Доэрти Р. Стабильность структуры металлических систем. – М.: Атомиздат, 1978. – 280 с.
  2. Еременко В. Н. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – К.: АН УССР, 1969. – 45 с.
  3. Лариков Л. Н., Гейченко В. В. Диффузионные процессы в упорядоченных сплавах. – К.: Наук. думка, 1985. – 214 с.
  4. Бородин И. Н. Композиции никеля с твердыми частицами // Защита металлов. – 1989. – №5. – С. 622-626.
  5. Костецкий Б. И., Бершадский Л. И. Структурная приспособляемость конструкционных материалов // Технология и организация производства. – 1984. – №4. – С. 15-17.
  6. Марковский Е. А. Влияние пластической деформации и температуры на усиление диффузионных процессов при трении // Литье и износостойкие материалы: Сб. – К.: ИПЛ АН УССР, 1978. – С. 19-25.
- Стаття надійшла до редакції 30.03.02.

УДК 621.9.08:620.179 (045)

С.М. Кіяшко, канд. техн. наук,  
 О.У. Стельмах, канд. техн. наук,  
 С.М. Смірнов, канд. фіз-мат. наук,  
 Л.М. Ільченко, канд. фіз-мат. наук,  
 О.Ю. Сидоренко, асп.,  
 С.О. Колєнов, асп.,  
 Р.Є. Костюнік, мол. наук. співроб.

## НОВИЙ СПОСІБ ПРОФІЛОМЕТРІЇ ТРИБОСИСТЕМ

*Доведено, що шорсткість робочих поверхонь і їхня об'ємна конфігурація у вузлах тертя є дуже важливою, а іноді і вирішальною характеристикою, яка суттєво впливає на ефективність трибосистем. Розглянуто лазерний скануючий профілограф-профілометр ЛСПП-03, який дозволяє створювати новітні промислові технології виготовлення поверхонь тертя трибосистем із надефективними трибохарактеристиками.*

Сучасна авіаційна техніка з точки зору трибології складається з великої кількості трибосистем, ресурс яких у сукупності визначає ресурс як літаків, так і наземної техніки в цілому. Традиційно в авіабудуванні всі трибосистеми є прицевійними, тобто поверхні тертя плунжерних пар, золотників, насосів-регуляторів виготовляються з високим ступенем точності та класом чистоти поверхонь.

Дослідження основних поверхонь тертя двигунів внутрішнього згоряння, трансмісії та інших систем наземної та авіаційної техніки вказують на те, що до поверхонь тертя в авіації ставляться більш високі вимоги. Так, трансмісія наземної техніки характеризується шорсткістю поверхні з параметром Ra 0,3...0,75 мкм, двигуни внутрішнього згоряння наземної техніки – шорсткістю поверхонь тертя з Ra 0,15...0,32 мкм, і практично всі поверхні тертя у літаках виготовляються з шорсткістю у межах Ra 0,02...0,2 мкм (ГОСТ 25142-82). Тобто, чим вищі вимоги до надійності вузлів та агрегатів, від яких залежить безпека польотів, руху та виробництва, тим вище клас чистоти поверхонь тертя того чи іншого виду техніки.

Наші власні експериментальні дослідження впливу шорсткості на ефективність трибосистем при випробуваннях авіаПММ і ПММ для наземної техніки є яскравим підтвердженням цих висновків. Хоча в класичній трибології всіма визнано так звану фундаментальну закономірність утворення оптимальної шорсткості, що підтверджено великою кількістю опублікованих експериментальних даних [1;2], ми вважаємо, що така закономірність дійсно існує, але рівень оптимальних шорсткостей значно менше технологічних можливостей вітчизняного виробництва. На наш погляд, використання принципу, що не слід виготовляти робочі поверхні тертя з високими