

УДК 621.793+621.891

В.Ф. Лабунець, канд. техн. наук, проф.,
В.Є. Марчук, канд. техн. наук, доц.,
Л.С. Братиця, доц.,
М.О. Ходак, канд. техн. наук, доц.

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРТЬОВИХ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуто результати досліджень триботехнічних характеристик газотермічних покриттів на основі оксидів алюмінію. Показано перспективність застосування оксидних покриттів для зміцнення і відновлення деталей вузлів тертя авіаційної наземної техніки.

Розвиток авіаційної наземної техніки на сучасному етапі характеризується значною інтенсифікацією процесів, що протікають на робочих поверхнях тертьових деталей, у зв'язку з ростом питомих навантажень, різким перепадом температур у зоні тертя, зміною швидкостей взаємного переміщення й якості робітничого середовища. Надійність і довговічність роботи вузлів тертя визначаються рівнем розвитку технології матеріалів і покриттів, серед яких особливе місце займають газотермічні і, зокрема, детонаційні покриття.

При нанесенні детонаційних покриттів на деталі утворюються високоякісні, практично безпористі шари з високим рівнем адгезійної міцності з матеріалом основи [1]. Застосування детонаційних покриттів дозволяє поліпшити і навіть цілком змінити поверхневі властивості деталей, одержати заздалегідь прогнозовані властивості робочих поверхонь, щоб якнайкраще задовольнити умови експлуатації. Особливо ефективними є детонаційні покриття в ремонтній практиці при відновленні зношених деталей [2; 3].

У багатьох випадках найкращими є детонаційні покриття з оксидів алюмінію, хрому, кремнію, титану, цирконію, різного роду шпінелей та інших кисневмісних порошкових матеріалів [1; 2; 4]. Оксиди мають унікальне сполучення технічно важливих властивостей: твердості, тугоплавкості, хімічної стійкості, і необмеженої взаємної розчинності в рідкому стані [5]. Завдяки цим властивостям оксиди знаходять застосування у вузлах тертя. Ідея використання оксидів у техніку як триботехнічних матеріалів не є новою. Добре відомі рубінові підшипники годинних механізмів і приладів, що відрізняються високою надійністю і довговічністю [6].

У цей час у вузлах тертя сучасних машин, механізмів і технологічного оснащення застосовуються триботехнічні матеріали на основі оксидів Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , TiO_2 та ін. [7–10]. Їх використовують у підшипниках ковзання і кочення, контактних ущільнювальних кільцях, теплообмінниках, деталях насосів, гальмах, вентилях тощо.

Основними перевагами заміни металевих деталей вузлів тертя на оксидні у порівнянні зі сталевими [11] є:

- висока міцність (300 МПа і більше), що зберігається до температури $1000^{\circ}C$;
- на 30...70 % знижена щільність;
- у десятки разів більш низька теплопровідність;
- майже однакова чи вища міцність на вигин і на стиск при високих температурах;
- вища твердість, жароміцність і корозійна стійкість;
- незначне забруднення атмосфери.

Незважаючи на зазначені переваги оксидів, крихкість матеріалів з них, мала теплопровідність, слабкий опір ударним навантаженням утрудняють використання їх у вузлах тертя. Тому перспективнішим є застосування оксидів як порошкових матеріалів при нанесенні захисних покриттів. Однак триботехнічні характеристики оксидних покриттів залежно від їхнього складу і зовнішніх механічних впливів систематично не вивчалися, що ускладнює процес обґрунтованого підбору перспективнішого матеріалу для необхідних умов експлуатації.

Комплексне дослідження триботехнічних характеристик детонаційних оксидних покриттів здійснювали у різних умовах контактної взаємодії.

Детонаційні оксидні покриття одержували на установці конструкції розробленої у Національному авіаційному університеті [12]. Як робочий газ використовували ацетиленокисневу суміш складу $C_2H_2:O_2=1:1,2$. Напилювання проводили на зразки зі сталі 45. Для того, щоб зменшити вплив нагрівання зразків на умови формування покриттів, напилювання здійснювали при скорострільності 60 циклів за 1 хв. Послідовність виконання окремих приймань одиничного циклу напилювання (подачі горючої суміші, порошку, запалення суміші, продувки стовбура) визначалася профілем кулачків розподільного вала, підібраних експериментально. Як матеріали для напилення використовували порошки на основі оксидів алюмінію, а введення легуючих компонентів (оксидів титану і заліза, інтерметалідів NiAl) здійснювали з метою зміни мікротвердості покриттів від 11,5 до 23 ГПа. Для повнішої оцінки впливу твердості покриттів на їхні триботехнічні характеристики досліджували алюмосиліційовану сталь 45 з мікротвердістю 6,8...7,9 ГПа.

Після напилювання поверхню покриттів шліфували до шорсткості $R_a=0,65...1,23$. Якість напилених покриттів оцінювали за міцністю зчеплення, пористістю та мікротвердістю. Міцність зчеплення покриття з основою визначали штифтовим методом. Для досліджуваних матеріалів при оптимальних режимах напилювання міцність зчеплення покриттів з основою складала 30...40 МПа. Пористість визначали при збільшенні в 100 разів методом порівняння з мікрофотографіями шкали пористості. При оптимальних режимах напилювання пористість покриття не перевищувала 1,5 %. Мікротвердість покриттів вимірювали на приладі ПМТ-3. Металографічний аналіз проводили на оптичному мікроскопі «НЕОФОТ-21», дослідження фазового складу, особливостей будови покриттів до і після тертя – на електронному мікроскопі «Camscan-4DV» і рентгенівському мікроаналізаторі системи «Link-860». При цьому робочими параметрами були:

- прискорювальна напруга 20 кВ;
- струм пучка $(2...3) \times 10^{-10}$ А;
- струм розжарювання катода 20...110 А.

Напилені детонаційні покриття характеризуються шаруватою структурою, що забезпечується:

- умовами їхнього формування;
- порційним нанесенням порошкових матеріалів із заданим ступенем перекриття і переміщення;
- послідовним накладанням шарів для досягнення необхідної товщини.

Структура покриттів на деяких ділянках характеризується наявністю мікропор (див. рисунок). Це обумовлено тим, що при пострілі (утворення одиничного шару) поряд з частин-



Наявність мікропор у структурі покриттів

ками, розігнаними до оптимальної швидкості, рухаються частинки, що мають набагато меншу швидкість і досягають поверхні підкладки останніми. Повільні частинки погіршують умови взаємодії між шарами [13]. Високі температури 3700 °С в зоні детонації [14], швидкість польоту частинок 800...1200 м/с, швидке затвердіння 10^6 - 10^8 напилених матеріалів [1] викликають значні структурно-фазові зміни в напилених матеріалах. В оксиді алюмінію в звичайних умовах експлуатації при температурах 950...1200 °С основна схема фазових перетворень γ -Al₂O₃, $\gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha$. У твердих температурно-тимчасових умовах детонаційного напилування процеси поліморфних перетворень прискорюються, утворення метастабільних фаз стає закономірним [15].

Одним з найбільш розповсюджених видів зношування є абразивне – механічне зношування матеріалу в результаті різання або дряпання твердих тіл чи частинок, що знаходяться в закріпленому чи вільному стані. Абразивні частинки проникають у зону тертя з повітрям, змащенням, пальними матеріалами, у процесі обробки абразивом та ін. Абразивну дію можуть спричиняти також тверді структурні складові сполучених поверхонь тертя. Взаємодіючи з металом, абразив призводить до зміни в його поверхневих шарах напруженого стану і ступеня пластичної деформації, що впливає на процеси тертя.

Випробування на абразивну зносостійкість покриттів проводили в умовах незакріпленого абразиву на установці Т-02. За абразив використовували порошок карбиду бору зернистістю 80–100 мкм. Вибір порошку В₄С обумовлений його високою твердістю за шкалою Мооса 9,6–9,7 одиниць, мікротвердістю 49,5-50 ГПа). Швидкість переміщення гумового кільця щодо сталевого зразка з покриттям складала 0,16 м/с, нормальне навантаження на зразок – 1,0 МПа. Знос покриттів визначали зважуванням зразків до і після випробувань на аналітичних терезах ВЛА-200М.

Деякі результати цих випробувань на зносостійкість наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Абразивна зносостійкість покриттів

Вид покриття	Склад покриття	Твердість матеріалу Н _μ , кг/мм ²	Відносна зносостійкість
Загартована сталь	–	600	1,0
Алюмосиліцирована сталь 45	Fe ₃ (AlSi) + Fe ₂ Al ₅	680–790	1,22
Детонаційне покриття	γ -Al ₂ O ₃ + α -Al ₂ O ₃	1150–1200	2,33
	γ -Al ₂ O ₃ + α -Al ₂ O ₃ +SiO ₂	1190–1250	2,36
	γ -Al ₂ O ₃ + α -Al ₂ O ₃ +TiO ₂	1300–1400	2,65
	γ -Al ₂ O ₃ + α -Al ₂ O ₃ +TiO ₂ + Fe+NiAl	2100–2300	3,82

Для порівняння отриманих даних у табл. 1 наведені результати абразивної зносостійкості загартованої сталі 45, твердість якої значно менше, ніж досліджуваних покриттів.

Як видно з табл. 1, зі збільшенням твердості зміцненої сталі її зносостійкість збільшується. Максимальну зносостійкість у даних умовах випробувань має детонаційне покриття, що містить, крім γ -Al₂O₃+ α -Al₂O₃, оксиди титану і заліза, а також інтерметаліди NiAl. Мікротвердість цього покриття приблизно в чотири рази більше мікротвердості загартованої сталі 45 і в два рази у порівнянні з алюмосиліційованим шаром, що утворився при дифузійному насиченні сталі алюмінієм і кремнієм.

Аналіз робочих поверхонь показує, що їхнє зношування відбувається, в основному, через розвиток процесів мікрорізання. У деяких випадках спостерігається викришування окремих зерен структурних складових покриття.

Отже, в умовах абразивного зношування одним з основних шляхів підвищення зносостійкості покриттів є збільшення їхньої твердості.

Збільшення твердості, як показали дослідження [16; 17], має свої межі. Так, у роботі [16] передбачається дотримуватися умов:

$$H_{\mu} \cong 1,3H_a,$$

де H_{μ} – твердість матеріалу; H_a – твердість абразиву.

Подальше підвищення твердості випробуваного матеріалу не призводить до підвищення його зносостійкості.

Підвищення твердості абразиву також має свої межі [17], після яких подальше підвищення твердості абразиву не призводить до зміни здатності, що зношує, і визначається інтервалами співвідношень твердості:

$$1,8 \leq \frac{H_{\mu}}{H_a} \leq 2,2.$$

Триботехнічні характеристики детонаційних покриттів в умовах граничного тертя визначали при терті ковзання в індустріальній олії И-20 за схемою вал-вкладиш. Як вал використовували загартовану сталь 45. Покриття наносили на поверхню вкладиша, виготовленого зі сталі 45. Деякі результати цих досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Триботехнічні характеристики покриттів в умовах граничного тертя

Вид покриття	Коефіцієнт тертя	Знос, мкм		Температура, °С
		пари тертя	контртіла	
Al ₂ O ₃	0,05	5,5	1,46	45
Al ₂ O ₃ +SiO ₂	0,06	5,3	1,41	48
Al ₂ O ₃ +TiO ₂	0,09	2,18	0,75	55
Al ₂ O ₃ +TiO ₂ + Fe+NiAl	0,095	2,25	0,625	60

У цих умовах випробувань максимальне значення коефіцієнта тертя має покриття електрокорунду, а мінімальне – Al₂O₃. Для останнього воно складає 0,05, для інших покриттів – 0,09...0,095. Максимальний знос пари тертя спостерігається для покриттів Al₂O₃ і складає 5,5 мкм/км при питомому навантаженні 1,0 МПа та швидкості ковзання 1,0 м/с. Температура в зоні тертя, вимірювана на відстані 1 мм від поверхні покриття для даних умов випробувань, склала 40 °С. Невеликі значення температури не впливають на процеси тертя і зношування, тому що окисні процеси, що забезпечують утворення стійких вторинних структур, не одержують інтенсивного розвитку.

Нанесення детонаційних оксидних покриттів на деталі вузлів тертя гусеничних машин показали їхню перевагу в порівнянні з гартуванням і цементацією. Особливо перспективний цей метод для відновлення спрацьованих деталей.

Список літератури

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Арновская. – К.: Наук. думка, 1978. – 544 с.
2. Хасуй А.Д., Моригаки О. Наплавка и напыление: Пер. с япон. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
3. Щенетов В.В., Лабунец В.Ф. Трибостойкие детонационные борсодержащие покрытия // Технология и организация производства. – 1991. – №4. – С. 43–45.
4. Кацуна А.А., Семенов А.П. Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда. – М.: Наука, 1974. – 120 с.
5. Борисова А.Л. Совместимость тугоплавких соединений с металлами и графитом: Справ. – К.: Наук. думка, 1985. – 247 с.
6. Фукс Г.И. Каменные подшипники. – М.: НИИЧАСПРОМ, 1968. – 121 с.

7. *Ceramics in gas turbine and reciprocating engines* // MPR: Metal Powder Rept. – 1986.– 41, №2.– P. 162–163.
8. *Geurts J.M. Veelzijdig constructiemateriaal Uingenieurskeramici* //PT/Werktuigbouw. – 1987. – 42, №2. – P. 29–33.
9. *Claser H., Lori W. Keramik als Konstruktionswerkstoff* // Schmierungstechnik. – 1987. – 17, №4.– S. 100–105.
10. *Knoch H., Steinmann D. Keramische Lager und Verschleißteile aus Siliciumnitrid, Siliciumcarbid und Dorkarbid* // Metal. – 1989. – 43. – S. 250–254.
11. *Kisty P. Sp, Orlov V.I. Recent trends of structural ceramics* // «Sintered metal-ceram. Compos. Proc. 3 – rd int. Sch., New Delhi, 6-9, 1983». – Amsterdam. – 1984. – P. 401–409.
12. *Лабунец В.Ф. Триботехнические характеристики детонационных оксидных покрытий* // Проблемы эксплуатации и надежности авиационной техники. – К.: КМУГА, 1997. – С. 41–44.
13. *Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового покрытия.* – М.: Наука, 1978. – 137 с.
14. *Семенов А.П., Федько Ю.П., Григорьев А.И. Детонационные покрытия и их применение.* – М.: НИИМаш, 1977. – 68 с.
15. *Федоренко В.К., Иващенко Р.К., Ремесло В.В., Москаленко Н.П. Влияние условий формирования на физико-механические свойства детонационных покрытий из Al_2O_3* // Порошковая металлургия. – 1985. – №9. – С. 39–45.
16. *Анисимов М.И., Галеев И.М., Гольдфайн В.Н. Износостойкие детонационные покрытия на основе оксида алюминия* // Защитные покрытия на металлах. – 1993. – Вып. 27. – С. 29–32.
17. *Сорокин Г.М., Коротков В.А. К вопросу выбора абразивного материала при испытании на абразивное изнашивание* // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – №12. – С. 332–337.

Стаття надійшла до редакції 30.03.02.