

УДК 621.891

Н.М. СТЕБЕЛЕЦЬКА, С.В. ФЕДОРЧУК, Ю.О. ЦИБРІЙ

Національний авіаційний університет, Київ

## ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ

*Досліджено закономірності формування детонаційних плазмових покриттів. Виконано хімічний і фазовий рентгено-структурний аналіз порошку та покриттів після напилювання. Представлені результати дослідження зносостійкості отриманих покриттів.*

**Ключові слова:** газотермічні покриття, зносостійкість, структура, фазовий склад, мікроструктура.

**Вступ.** У комплексі матеріалознавчих проблем авіаційної техніки помітне місце займають питання підвищення працездатності деталей, вузлів і механізмів, що працюють в умовах тертя під впливом корозійноактивних середовищ. Тому важливо підвищувати антифрикційні властивості титанових сплавів, що, як відомо, через їх особливості (високу питому міцність, немагнітність) є перспективними конструкційними матеріалами. Чутливість титанових сплавів до перегрівання і концентраторів напружень, схильність до наводжування обмежують вибір методів поверхневого зміцнення.

Ефективним способом підвищення ресурсу та надійності деталей авіаційної техніки є застосування покриттів, нанесених методами газотермічного напилювання (плазмового, детонаційного, газополуменевого), що характеризуються високою продуктивністю, універсальністю застосовуваних для напилювання матеріалів, невисокою (не більше 200 °С) температурою нагрівання підкладки, значною товщиною одержуваних покриттів (до декількох міліметрів), можливістю повторного відновлення зношених деталей [1; 2].

Газотермічне напилювання, що має широкі технологічні можливості, дозволяє досягти найбільшої ефективності застосування порошків у народному господарстві.

Застосування газотермічного напилювання для деталей, що зношуються, визначають за їх високими антифрикційними властивостями, що впливають на працездатність матеріалів з такими покриттями у вузлах тертя залежно від технологічних факторів і властивостей покриття, рівня зовнішніх факторів середовища, матеріалу контртіла.

**Результати досліджень.** У цій статті представлені результати дослідження зносостійкості, структури, фазового складу плазмових покриттів на титанових сплавах для окремих деталей гідросистеми літака.

Плазмове покриття – це своєрідний матеріал, отриманий внаслідок удару, деформації і надзвичайно швидкої кристалізації невеликих (10 – 150 мкм) частинок матеріалу, напиленого на підкладку. Послідовно накладаючись одна на одну, частинки утворюють шарувате покриття з анізотропією фізичних і механічних властивостей, неоднорідне щодо структури і хімічного складу. Це характеризується розвинутою поверхнею стиків між частинками і підвищеним умістом оксидних вкраплень, особливо по межах частинок і окремих шарів (рис. 1).

Контактні процеси, що відбуваються під час ударів, деформації, затвердіння й охолодження частинок, а також процеси їх фізико-хімічної взаємодії з плазмо-

утворювальними газами і навколишнім середовищем під час руху до підкладки визначають структуру і властивості покриття.

У разі детонаційного напилення, що є імпульсним процесом, у результаті одиничного циклу формується покриття товщиною 5 мкм, тобто покриття, товщина якого більша за 40 мкм, майже завжди багат шарове. Неодмінною умовою для напилення є часткове плавлення матеріалу, але менше, ніж за плазмового напилення. За рахунок високої концентрації частинок контактна температура між ними у процесі формування одиничного шару близька до температури плавлення, тому межі між окремими частинками стираються. Одиничний шар при мікроскопічних дослідженнях виглядає монолітним, у той час, як межі між шарами фіксуються досить чітко.

Особливість таких покриттів полягає у формуванні шарів з різним ступенем проплавлення напиленого матеріалу, що негативно позначається на їхніх властивостях. Шар покриття найближчої і зовнішньої поверхні найбільш слабо зв'язаний з передніми поверхнями, оскільки додатково незміцнений (ефект ударного гарячого пресування) під час напилення наступних шарів.

Значущим фактором детонаційного напилення є процеси взаємного впливу частинок і велика їх швидкість, що формує структуру, відмінну від структури плазмових покриттів.

Слід зупинитися на газотермічних покриттях з порошку карбїду титану з різними зв'язками, оскільки цей матеріал був найбільше досліджений.

Типові структури плазмових і детонаційних покриттів з досліджуваних порошків показано на рис. 1.

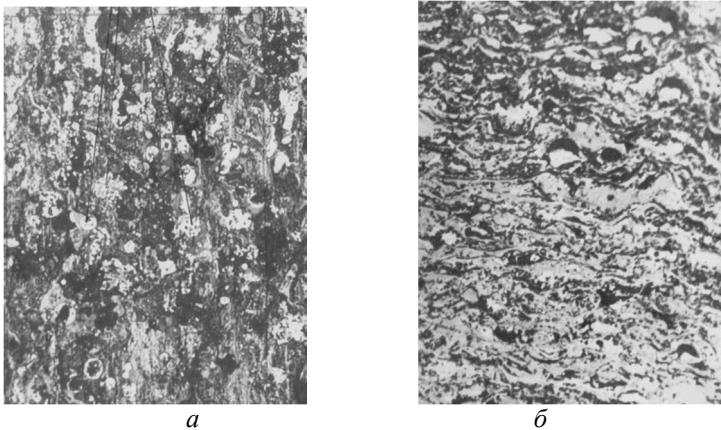


Рис. 1. Мікроструктура газотермічних покриттів (TiC)Ni: *а* – плазмове напилення в струмені аргону; *б* – детонаційне напилення,  $\times 300$

Встановлено, що структура покриттів після напилення складається з частинок карбїдів, розподілених у металевій матриці, а також оксидів плакувальних елементів. Мікроструктура неоднорідна за величиною структури складових, їх мікротвердості й розподілу. Мікротвердість частинок змінюється залежно від виду плакувального металу та величини карбїдів. Якщо величина вихідних частинок становила 80 – 100 мкм та карбїдні вкраплення мали мікротвердість 14 – 29 ГПа. Зі зменшенням величини вихідних частинок спостерігається повніша взаємодія їх з плакувальним матеріалом у процесі напилення. Мікротвердість карбїдів при цьому зменшується.

Розміри карбідних частинок у плазмовому покритті з карбиду титану, плакованого нікелем і міддю, – 20 – 60 мкм. У структурі спостерігаються окремі конгломерати частинок, що утворилися очевидно на стадії плакування порошку. Структура детонаційних покриттів характеризується більш рівномірним розподілом частинок у матриці, мікротвердість їх не перевищує 12 ГПа, розмір – не більше 10 – 15 мкм.

Виконано хімічний, фазовий рентгено-структурний аналіз порошку, покриття після плазмового і детонаційного напилювання. Вивчено розподіл елементів С, Ti, Ni, Cu, P, O<sub>2</sub> у фазах мікрорентгеноспектральним аналізом на приладі «Superprobe-733».

Фазовим аналізом встановлено велику кількість структурних складових різної кристалографічної природи. Поряд з основною фазою з карбиду титану і плакувального елемента у вихідному порошку помітні оксиди заліза.

Після газотермічного напилення взаємодія порошку з робочим газом і навколишнім середовищем, а також особливості контактних процесів з підкладкою під час напилювання зумовлюють заміну фазового складу, про що свідчать отримані дані. Основними фазами в структурі є: карбід титану, складний карбід NiC, нікель, мідь, їх інтерметаліди, а також оксиди титану й міді. Були виявлені у значній кількості оксиди заліза, очевидно спричинені інтенсивністю дифракційних ліній, а також невелика кількість хрому, сполук кремнію. Наявність подібних фаз підтверджено мікрорентгеноспектральним аналізом. Одержано топограми поверхні плазмового покриття (TiC, Ni, Cu) у характеристичних рентгенівських променях, що являють собою якісний розподіл елементів у фазах. Зображення, отримані в характеристичних рентгенівських променях, показали, що найбільш рівномірно розподіляється між карбідними частинками нікель, потім мідь.

Фосфор найчастіше нагромаджується навколо порівняно дрібних карбідних частинок. У процесі детонаційного напилювання збільшується частка фосфору в матриці порівняно з плазмовим, що зумовлено розміром частинок (не більше 40 мкм) вихідного порошку (і відповідно потовщенням плакувальної оболонки), а також меншим його вигоранням. Рентгенофазовий аналіз показав при цьому невелику кількість фосфідів нікелю (Ni<sub>2</sub>P), які є у структурі як детонаційних так і плазмових покриттів (рис. 2).

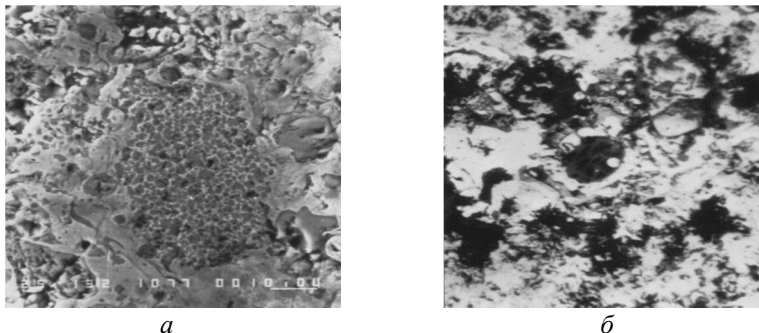


Рис. 2. Мікроструктура плазмового покриття (TiC) CuNi: *а* – зображення у вторинних електронах,  $\times 1300$ ; *б* – зображення у світловому мікроскопі,  $\times 500$

Істотних відмінностей у фазовому складі детонаційних і плазмових покриттів не виявлено. Однак відзначається збільшення фазового складу покриттів з порошку карбиду титану, плакованого нікелем і міддю. Складність фазового

складу, наявність у структурі фаз елементів, що спеціально не вводяться в склад покриття, зумовлено, мабуть, технологічними домішками на стадії виготовлення порошку карбиду, його плакування і напилювання. Хімічний аналіз порошку і покриття показав наявність у їх складі хрому, кремнію, фосфору, масові частки яких не перевищують 1 %. Спектральний аналіз показує наявність у невеликих кількостях ряду елементів: Mn, Al, Si, Co, Mo. Складність хімічного складу, що визначається різноманітністю фаз, одержуваних у процесі напилювання, сприяє гетерогенізації структури.

Істотної взаємодії карбідних частинок з плакувальною оболонкою не визначено. Плакувальний метал щільно прилягає до частинок, спостерігається незначне розчинення вуглецю і титану в нікелі, про що свідчать криві розподілу інтенсивності елементів на межі розділу карбід – матриця.

Поряд з титаном і вуглецем у деяких карбідних частинках помітне скупчення заліза, неоднаково розподілене в частинці. Разом з цим залізо наявне також у вигляді оксидів. Вуглець рівномірно розподілений по тілу карбідних частинок. Однак у тих випадках, коли карбіди мають явні дефекти будови у вигляді пор, виїмок тощо, спостерігається зниження вмісту вуглецю в цих місцях.

Отримані результати свідчать про складність і різноманіття фазових перетворень, що відбуваються у процесі напилювання, зумовлених хімічним складом вихідного порошку і його взаємодією з робочим газом і навколишнім середовищем.

Тому для одержання стабільної структури за фазовим складом, а отже, для забезпечення стабільних властивостей покриттів необхідно строго контролювати хімічний склад на стадії виготовлення порошку, його плакування, а також застосовувати для напилення контрольовану атмосферу.

**Висновки.** Із наведених досліджень установлено, що титанові сплави мають низькі антифрикційні властивості: високий і нестабільний коефіцієнт тертя і схильні до схоплювання. Основний напрям підвищення працездатності титанових сплавів у вузлах тертя – застосування покриттів на деталях з цих сплавів. Найперспективніші покриття, які нанесено різними методами напилювання, що за технологічними можливостями, техніко-економічними показниками мають істотні переваги перед традиційними методами нанесення покриттів.

#### Список літератури

1. Борисов Ю. С., Полищук И. Е., Кульгавый Э. А. Применение газотермического напыления для восстановления изношенных деталей авиационной техники // X Всесоюзное совещание (5 – 7 июня, 1985): Тезисы докл. – Дмитров: 1985. – С. 18 – 21.
2. Кіндрачук М. В., Дудка О. І. Куницький Ю. А. Структуроутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів. – К.: Вища шк. – 1997. – 121 с.
3. Pohrelyuk, I.M. Wear Resistance of VT22 Titanium Alloy After Nitriding Combined with Heat Treatment / I.M. Pohrelyuk, M.V. Kindrachuk, S.M. Lavrys' // Materials Science. – 2016. – № 52 (1). – pp. 56-61.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2018

**Стебелецька Наталія Миронівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри загальноінженерної підготовки ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, обл. Тернопільська, Україна, 47501.

**Федорчук Світлана Володимирівна** – старший викладач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Цибрій Юрій Олександрович** – кандидат техн. наук, асистент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

*N.M. STEBELETSKA, S.V. FEDORCHUK, Yu. O. TSUBRII*

## FORMATION OF WEAR-RESISTANT GASOTERMIC COATINGS ON TITANIUM ALLOYS

The patterns of formation of detonating plasma coatings are investigated. Chemical and phase X-ray-structural analysis of powder and coatings after spraying are performed. The study results of the obtained coatings wear resistance are presented. It is established that the coating structure after spraying consists of carbides particles distributed in the metal matrix, as well as oxide of the weeping elements. The microstructure is heterogeneous in terms of the components structure, their microhardness and distribution. The microhardness of the particles varies depending on the type of the curing metal and the size of the carbides. If the output particles are 80-100  $\mu\text{m}$ , the carbide impregnation has a microhardness of 14-29 GPa. With a decrease in the magnitude of the source particles there is a more complete interaction with the material in the process of spraying. Microhardness of carbides at the same time decreases. The sizes of carbide particles in the plasma coating of titanium carbide, covered with nickel and copper, are 20-60  $\mu\text{m}$ . In the structure there are separate conglomerates of particles that are formed obviously at the stage of the powder coating. The structure of detonation coatings is characterized by a more even distribution of particles in the matrix, their microhardness does not exceed 12 GPa, the size - no more than 10 - 15 microns. According to the abovementioned studies, it has been established that titanium alloys have low antifriction properties: high and unstable friction coefficient and are disposed to solidification. The main way of increasing the efficiency of titanium alloys in the nodes of friction - the application of coatings on parts of these alloys. The most promising coatings that are applied by various spraying methods, due to technological capabilities, technical and economic indicators, that have significant advantages over traditional coating methods.

**Key words:** gas-thermal coatings, wear-resistance, structure, phase composition, microstructure.

### References

1. Borisov Ju. S., Polishchuk I. E., Kul'gavyj Je. A. *Primenenie gazotermicheskogo napylenija dlja vosstanovlenija iznoshennyh detalej aviacionnoj tehniki // H Vsesoju-znoe soveshhanie (5 – 7 ijunja, 1985): Tezisy dokl. – Dmitrov: 1985. – S. 18 – 21.*
2. Kindrachuk M. V., Dudka O. I. *Kuny'cz'ky'j Yu. A. Struktu- routvorennya ta formuvannya try'botexnichny'x vlasty'vostej evteky'chny'x pokry'ttiv. – K.: Vy'shha shk. – 1997. – 121 s.*
3. Pohrelyuk, I.M. *Wear Resistance of VT22 Titanium Alloy After Nitriding Combined with Heat Treatment / I.M. Pohrelyuk, M.V. Kindrachuk, S.M. Lavrys' // Materials Science. – 2016. – № 52 (1). – pp. 56-61.*