

K. N. Khranovska, V. F. Mazanko, E. V. Ivashchenko

Alloying of materials by metallic micropowders

Summary

It is shown a possibility of deep penetration of small particles of powder into volume of metal by complex multiply action of impulsive shock loading with simultaneous transmission of pulse current. The changing of size of powder particles is investigated and speed of their motion is calculated.

УДК 621.793.71

## *Високошвидкісне повітряно-паливне напилення жаро- та зносостійких покриттів*

В. М. Кисіль, Ю. І. Євдокименко, С. В. Бучаков

Інститут проблем металознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

*Розглянуто особливості технології високошвидкісного повітряно-паливного напилення і застосування її для нанесення жаро- та зносостійких покриттів з високолегованих сплавів. Наведено структури та властивості покриттів з промислових порошків сплавів на основі заліза, нікелю, хрому, кобальту, твердого сплаву на основі карбїду вольфраму з нікелевою зв'язкою, а також інтерметалїдів системи Ni-Al. Показано, що за якістю покриття, отримані за технологією високошвидкісного повітряно-паливного напилення, не поступаються покриттям, отриманим іншими газотермічними методами.*

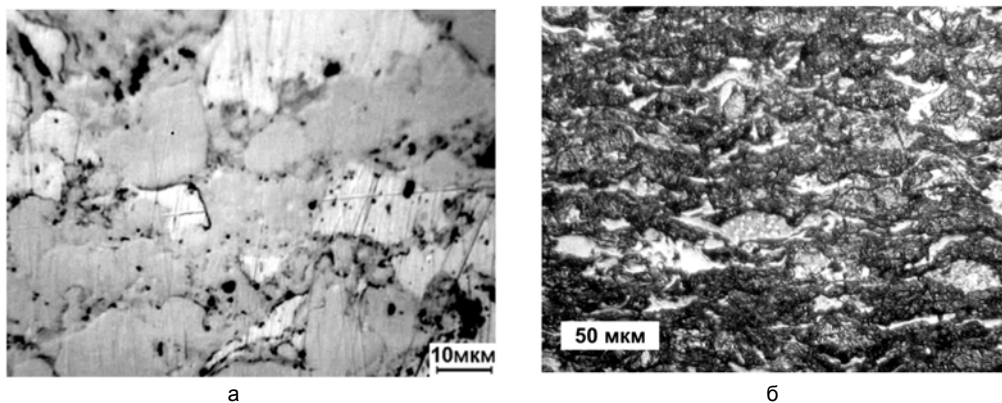
Останнє десятиріччя характеризується інтенсивним впровадженням в виробничу практику передових промислових країн нового газотермічного процесу нанесення покриттів – високошвидкісного повітряно-паливного напилення (ВППН). Розробка нових принципів організації робочих процесів в камерах згоряння пальників [1, 2] дозволила отримувати цим методом покриття з порошків більшості металів і сплавів, композиційних матеріалів з металевою зв'язкою, які за якістю перевершують такі, отримані традиційними методами, або, принаймні, не поступаються їм [3]. При цьому ВППН перевершує інші методи газотермічного напилення по продуктивності і економічності [4].

Головною особливістю методу ВППН є відносно низька температура газової фази потоку, що дозволяє наносити дисперсні (< 40 мкм) порошки без перегрівання частинок і пов'язаного з ним інтенсивного окислення. Аналіз представлених фірмою UniqueCoat Technologies (США) мікроструктур і властивостей покриттів з нікель-хромових сплавів, твердих сплавів на основі карбїдів вольфраму та хрому, нанесених за технологією ВППН (методом АС-HVAF) [3, 5], дозволяє віднести ці покриття до найкращих зразків газотермічних покриттів. Для них характерні пористість на рівні менше 1 %, висока адгезійна міцність (45 – 75 МПа металевих покриттів, 65 – 75 МПа – твердосплавних), яка зумовлена мінімумом дефектів на границі покриття з підкладкою та виключно низьким вмістом оксидів.

В ІПМ НАН України розроблені пальники для високошвидкісного газополуменевого наплення з витратним керуванням параметрами газового потоку. Така організація внутрішньокамерних процесів дозволяє в 1,5 – 2,0 рази підвищити ефективність процесу міжфазового теплообміну без помітної втрати швидкості частинок [6]. В роботі використовувався пальник для ВППН «Град-ВМ», який працює на повітрі та уайт-спіриті. Метою дослідження були вибір та опрацювання технологічних режимів нанесення покриттів та вивчення їх властивостей.

Досліджено покриття з промислових порошків двох груп, які широко застосовуються в практиці газотермічного наплення. Першу групу склали металеві та твердосплавні порошки стандартного гранулометричного складу (у стані постачання), другу – нікель-алюмінієві сплави, просяні для одержання фракції менше 40 мкм. Наплення проводили при тиску у камері згоряння  $P_{кс} = 1,0$  МПа, витраті паливної суміші до 68 г/с і витраті порошку до 6,5 г/с. Покриття наносили на пласкі підкладки товщиною 4 мм зі сталі 20, сталі 12Х18Н9Т, міді та алюмінію, а також на зразки для вимірювання адгезійної міцності (на сталі 12Х18Н9Т) штифтовим методом. Товщина покриття складала 0,2 – 0,5 мм, коефіцієнт використання порошків першої групи – до 0,65, порошків другої – до 0,76.

При дослідженні покриттів використовували методи мікроструктурного і рентгенофазового аналізів, вимірювання мікротвердості та адгезійної міцності [6]. Зображення характерних мікроструктур отриманих покриттів показано на рисунку.



Мікроструктура ВППН покриттів (поперечні перерізи). а – покриття з порошку високолегованого чавуну ПГС27, б – покриття з порошку ПН85Ю15.

Властивості покриттів, отриманих з металевих та твердосплавних порошків наведено в табл. 1, інтерметалідних покриттів з порошків нікель - алюмінієвих сплавів – в табл. 2.

Мікротвердість досліджених покриттів добре узгоджується з мікротвердістю покриттів, отриманих методом високошвидкісного киснево-паливного наплення [7].

Отримані покриття характеризуються високою якістю, мають однорідну поверхню з шорсткістю в межах  $Rz40 - Rz80$ . Всі покриття відрізняються щільним приляганням до підкладки, дефекти структури у вигляді великих пор, розшарувань і тріщин на більшості зразків практично відсутні. Покриття з порошків першої групи мають характерну для ВППН-покриттів структуру (рисунок а), яка вказує на формування їх з частинок, які знаходяться в твердому стані, за рахунок їх пластичної деформації в процесі високошвидкісного співударяння.

Покриття другої групи, які містять інтерметалідні сполуки системи Ni-Al, мають явно виражену гетерофазну безпористу мікроструктуру, утворену блоками

Таблиця 1

Властивості ВППН покриттів з промислових порошків

Марка порошку і його дисперсність	Склад порошку	Пористість, %	Адгезія, МПа
ПР-Х18Н9 (– 50 мкм)	Fe (основа), 18 % Cr, 9 % Ni, < 0,9 % C	< 1,5	78 – 83
ПГ-С27 (– 80 мкм)	Fe (основа), 27 % Cr, 4 % C	< 2,8	46 – 52
ПГ-10Н-01 (– 100 мкм)	Ni (основа), 27 % Cr, 3% В	< 4,0	68 – 71
ПГ-СР4 (– 100 мкм)	Ni, 16 % Cr, 3,5 % В, 3,2 % Si, < 5 % Fe	< 3,5	66 – 70
ПГ-10К-01 (– 100 мкм)	Co (основа); 30 % Ni, 23 % Cr, < 2 % Fe, 1,5 % C, 1,0 % Si, 1,5 % В, 4,0 %W	< 5,0	48 – 52
ВН - 20 (– 80 мкм)	WC (основа), 20 % Ni	< 3,0	78 – 108

Таблиця 2

Властивості ВППН покриттів з порошків нікель-алюмінієвих сплавів

Марка порошку	Склад порошку за результатами хімічного аналізу	Пористість покриття, %	Адгезійна міцність, МПа	Мікротвердість, ГПа
ПН85Ю15	Ni (основа), 14,2 % Al, 0,18 % O <sub>2</sub>	0,6	48 – 57	7,0 ± 0,4
ПТЮ5Н	Ni (основа), 5,3 % Al, 0,9 % O <sub>2</sub>	< 1,0	40 – 52	3,25 ± 0,4
НАС	Ni (основа), 18,1 % Al, 5,2 % Si, 0,35 % O <sub>2</sub>	0,8	51 – 54	7,2 – 11,5

розміром 10 – 50 мкм з включеннями у вигляді ламелей між ними (рисунок б). Така структура покриттів свідчить про їх формування з відносно крупних твердих частинок і дрібних частинок, які знаходяться у повністю або частково розплавленому стані. Рентгенофазовий аналіз показав сталість фазового складу покриттів за їх глибиною. Основними фазами в покритті з порошку ПН85Ю15 є Ni<sub>3</sub>Al і Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>, в значній кількості присутні нікель та NiAl, також є невелика кількість NiAl<sub>3</sub>. В покритті з порошку НАС основні фази – нікель та NiAl, наявні сліди Ni<sub>3</sub>Al. В покритті з терморегулюючого порошку ПТЮ5Н основними фазами є фази нікель, Ni<sub>3</sub>Al, NiAl і спостерігаються сліди оксиду Ni<sub>2</sub>Al<sub>18</sub>O<sub>29</sub>.

Аналіз даних табл. 1 показує, що адгезійна міцність покриттів першої групи знаходиться на рівні адгезійної міцності покриттів, нанесених методом АС-HVAF [5], а металокерамічного покриття на основі карбіду вольфраму навіть суттєво вища [3] і близька до міцності детонаційних покриттів. В той же час пористість цих покриттів помітно вища. Це пояснюється тим, що при напилюванні методом АС-HVAF використовувалися оптимізовані за гранулометричним складом порошки з розміром частинок менше 40 мкм, що забезпечило їх більш високу середню швидкість в процесі напилювання та, відповідно, більш щільну упаковку в покритті. Проведені за методикою [8] розрахунки показують, що оптимальний діапазон розмірів частинок порошків сплавів на основі заліза, нікелю, хрому і кобальту для ВППН пальником «Град-ВМ» складає 15 – 55 мкм.

**Висновки** Високошвидкісне повітряно-паливного напилення пальниками з витратним керуванням параметрами газового потоку дозволяє наносити жаро- та зносостійкі покриття з металевих і композиційних з металевою зв'язкою порошків, які по своїй якості не поступаються кращим зразкам покриттів, отриманих методом АС-HVAF та іншими методами газотермічного напилення. Характерними особливостями

таких покриттів є низька пористість (менше 1 %) та максимальне збереження хімічного складу вихідного порошку, в том числі – за вмістом оксидів, а також висока адгезійна міцність. При цьому ВППН забезпечує високі (до 24 кг/год) продуктивність та ефективність використання енергоносіїв (0,65 кг рідкого палива та 8 м<sup>3</sup> стислого повітря на 1 кг металевого порошку).

### Література

1. Patent 6245390 USA, Int. Cl.<sup>7</sup> C23C 4/12; B05B 1/24. High-velocity thermal spray apparatus and method of forming materials / V. Baranovski, A. Verstak. – Publication Date: 06.12.2001.
2. Патент 57147 Україна, МПК 6 B05B7/20. Спосіб газотермічного напилення порошкових матеріалів / Ю.І. Євдокименко, В.М. Кисель, В.Х. Кадилов, В.І. Тимошенко, В.П. Галинський, І.С. Білоцерковець. – Бюл. «Промислова власність». – 2003. – № 6.
3. Verstak A., Baranovski V. AC-HVAF sprayed Tungsten Carbide: Properties and Applications / Thermal Spray 2006: Science, Innovation and Application // Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference. – P. 643 – 648.
4. Sartwell B. D., Natishan P. M., Legg K. O. HVAF vs. HVOF // Proceedings of the AESF Aerospace / Airline Plating Forum. – 1998. – P. 97 – 104.
5. Verstak A., Baranovski V. Activated Combustion HVAF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion / Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology // Proceedings of the AESF Aerospace / ASM Publication. – 2003. – V. 1. – P. 324 – 331.
6. Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Кадыров В.Х. и др. Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами // Порошк. металлургия. – 2003. – № 11/12. – С. 45 – 54.
7. Tahar Sahraoui, Nour-Eddine Fenineche, Ghislain Montavon. Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty). // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – № 152. – P. 43 – 55.
8. Тимошенко В.И., Белоцерковец И.С. Исследование процессов в горелочных устройствах для высокоскоростного газопламенного напыления порошковых материалов с использованием расходного способа воздействия на поток // Инженерно-физический журнал. – 2002. – № 2. – С. 36 – 41.

Одержано 03.12.09

**В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко, С. В. Буцаков**

### **Высокоскоростное воздушно-топливное напыление жаро- и износостойких покрытий**

#### **Резюме**

Рассмотрены особенности технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления и применения его для нанесения жаро- и износостойких покрытий из высоколегированных сплавов. Описан процесс высокоскоростного воздушно-топливного напыления двухкамерной горелкой «Град-ВМ» (ИПМ НАНУ), приведены структуры и свойства полученных покрытий из промышленных порошков сплавов на основе железа, никеля, хрома, кобальта, твердого сплава на основе карбида вольфрама с никелевой связкой, а также интерметаллидов системы Ni – Al. Показано, что по своему качеству эти покрытия не уступают покрытиям, полученным другими газотермическими методами.

V. M. Kysil, Yu. I. Yevdokimenko, S. V. Buchakov

## High velocity air-fuel spraying of heat and wear resistant coatings

### Summary

Features of high velocity air-fuel spraying technology and deposition applying of heat and wear resistant coatings with high-alloy are considered.

The high velocity air-fuel spraying process by two-chamber torch "Grad-VM" is described, the structure and properties of coatings obtained from commercial powders of alloys based on iron, nickel, chromium, cobalt, hard-facing alloy based on tungsten carbide with nickel binder as well as intermetallic system Ni – Al are given.

It is shown that the quality of these coatings is not inferior to the coatings obtained by other gas-thermal methods.

УДК 536:669:621.762

## Особливості формування наночастинок при електроіскровій обробці заліза

К. Г. Лопатько, кандидат технічних наук

Є. Г. Афтанділянц, доктор технічних наук

Я. В. Зауличний\*, доктор фізико-математичних наук

М. В. Карпець\*, доктор фізико-математичних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

\* Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

*Наведено результати досліджень хімічного складу, структури та хімічного стану поверхні наночастинок, отриманих при електроіскровій обробці заліза. Показано, що при електроіскровій обробці заліза можливе отримання  $\gamma$ -заліза.*

Формування наночастинок в умовах електроіскрової обробки відбувається при високих температурі, тиску та швидкості охолодження, що створює передумови для фіксації високотемпературних фаз і їх існування за нормальних умов. Відомо [1], що наночастинки металів, які отримані шляхом електроіскрової обробки речовин в рідині ефективно взаємодіють з навколишнім середовищем, що може бути використано.

Тому для встановлення можливості реалізації таких явищ дослідили хімічний склад, структуру та стан поверхні наночастинок, отриманих при електроіскровій обробці заліза в воді.

Наночастинки отримували шляхом електроіскрової обробки гранул заліза, які завантажували у розрядну камеру з електродами з того ж матеріалу, наливали воду, вмикали генератор розрядних імпульсів і отримували колоїдний розчин залізовмісних речовин у воді [2 – 4].