ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ БАГАТОКАМЕРНИМ ДЕТОНАЦІЙНИМ ПРИСТРОЄМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін

IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Е-mail: okolis@i.ua Для нанесення покриттів із порошку WC–Co–Cr AMPERIT[®]554.074 використовувався багатокамерний детонаційний пристрій. Дослідження мікроструктури покриттів і фазового складу були проведені зі застосуванням методів растрової електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. При напиленні даним методом формуються щільні покриття, що складаються з включень фаз карбіду вольфраму, рівномірно розподілених у Co–Cr матриці. Пористість покриттів складає ~0,2 %, мікротвердість – 10,4 ± 1,2 ГПа. Показано досвід застосування багатокамерного детонаційного пристрою для нанесення зносостійких покриттів з порошку WC–Co–Cr як на стадії відновлення деталей, так і при проєктуванні вузлів різних механізмів. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: газотермічне напилювання, детонаційний пристрій, твердий сплав, покриття, мікроструктура, знос, пористість, твердість, промислове застосування

Вступ. Металокерамічні покриття, що напилюються газотермічними методами, є ефективним рішенням широкого спектра завдань щодо збільшення строку служби деталей машин і різних пристроїв [1, 2]. Покриття на основі карбіду вольфраму і карбіду хрому часто використовуються для підвищення зносостійкості в парах тертя, опору абразивному, корозійному й ерозійному зносу в насосно-компресорному і турбінному обладнанні, трубопровідній та запірній арматурі, в деталях целюлозно-паперової, текстильної, авіаційної галузей тощо. Крім того, напилювання твердосплавних покриттів вважається альтернативою гальванічному хромуванню через суворі екологічні норми й проблеми з витратами в технології процесу гальванічного нанесення покриттів [3]. Металокерамічні покриття наносять переважно високошвидкісним киснево-паливним методом (HVOF) і детонаційним напилюванням (DS) [4-6], унаслідок більш низької температури частинок порошку в потоці продуктів згоряння і меншого часу в польоті порівняно з плазмовими методами. Це дозволяє уникнути значного вмісту крихких фаз, а також зниження ступеня розкладу карбідів у процесі напилювання, запобігаючи водночас зменшенню твердості та зносостійкості. До того ж вищі швидкості частинок у високошвидкісних процесах забезпечують якісніше покриття з вищою когезією, адгезією, низькою пористістю. Наразі через вимоги до якості металокерамічних покриттів, що постійно зростають, ведуться роботи як зі створення нових, так і оптимізації існуючих технологій газотермічного напилювання. Окрім HVOF і DS, для нанесення металокераміки дедалі

частіше застосовуються такі технології, як холодне газодинамічне напилювання (CS) і метод високошвидкісного повітряно-паливного напилення (HVAF) [7, 8]. Розвивається також напрям і детонаційного нанесення металокерамічних покриттів [9]. Як один із багаточисельних варіантів конструкцій детонаційних пушок для газотермічного напилювання в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (IE3) було розроблено багатокамерний безклапанний детонаційний пристрій (БКДП). Метою даної роботи є дослідження мікроструктури і властивостей покриттів системи WC–Co–Cr, отриманих за допомогою БКДП, а також можливості його застосування для нанесення покриттів на вироби різних галузей промисловості.

Обладнання, матеріали та методики дослідження. Для нанесення покриттів на поверхню зразків зі сталі 12Х18Н10Т використовували порошок WC–Co–Cr (86 %–10 %–4 %) (H.C. Stark) фракції 15...45 мкм (марка AMPERIT®554.074). Дослідження мікроструктури, елементного складу та морфології порошку (рис. 1, табл. 1) проводили на растровому електронному мікроскопі QUANTA 200 3D. За допомогою енергодисперсійного аналізатора рентгенівського випромінювання фірми EDAX, вбудованого в растровий електронний мікроскоп, були отримані спектри характеристичного рентгенівського випромінювання поверхні зразків порошку.

Покриття напилювали багатокамерним детонаційним пристроєм (БКДП) [10]. У цьому пристрої реалізується режим детонаційного горіння газової суміші в спеціально спрофільованих камерах. Схематично пристрій показано на рис. 2.

Колісніченко О.В. – https://orcid.org/0000-0003-4507-9050, Тюрін Ю.М. – https://orcid.org/0000-0002-7901-7395 © О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін, 2023



Рис. 1. Порошок AMPERIT®554.074: *a* – морфологія поверхні порошку WC–Co–Cr; *б* – спектр характеристичного рентгенівського випромінювання поверхні порошку

Таблиня	1.	Елементний	і склал	порошку	W	C-Co	⊢Ci
1 aornan	••	Latententinnin	c c c c c c c c c c c c c c c c c c c	nopomity			, .

Порошок	Елемент, Wt^*/At^*					
	С	Cr	Со	W		
WC–Co–Cr	4,77/36,94	3,57/6,39	9,60/15,16	82,05/41,51		
* Wt was 0/2: ** 1t or 0/2						



Рис. 2. Схема багатокамерного детонаційного пристрою: 1 – свічка запалювання; 2 – форкамера; 3 – циліндрична камера згорання; 4 – кільцева камера згорання; 5 – подання порошку; 6 – ствол

Акумулювання енергії згорання від двох камер (циліндричної та кільцевої) в стволі забезпечує формування високошвидкісного струменю продуктів згорання, який прискорює і нагріває порошок, що напилюється [11]. У пристрої реалізоване безперервне подання горючої газової суміші й порошку, що дозволяє ініціювати детонаційний процес згорання з великою частотою – 20 Гц і вище. На рис. 3 показано БКДП для напилювання покриттів, розміщений у звукоізоляційному боксі, оснащеному обладнанням для управління технологічним процесом. Обладнання складається з: пристрою для напилювання, стандартного поро-



Рис. 3. Пристрій для нанесення покриттів з використанням БКДП

шкового живильника з поданням порошку до 3 кг/год, стандартної газової панелі низького тиску (макс. 0,3 МПа) для подання кисню, пропан-бутану, повітря й автоматизованої системи управління.

У процесі напилювання швидкість переміщення зразка, що напилюється, відносно ствола детонаційного пристрою становила 2000 мм хв, відстань до зразка – 50 мм, витрата порошку – 1,5 кг/год, витрата транспортуючого газу (азот) – 1 м³/год, частота детонації – 20 Гц. У табл. 2 наведені дані щодо витрати компонентів горючої газової суміші.

Структурно-фазовий аналіз зразків порошку й напиленого покриття з WC–Co–Cr проводили методом рентгенівської дифракції в області кутів 20 від 20 до 100° із покроковим скануванням $\Delta(2\theta) =$ = 0,05° і часом експозиції 7 с у точці за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 (у монохроматичному Cuk_α-випромінюванні, $\lambda = 0,154059$ нм), що дає інтегральну інформацію про шар товщиною в кілька мікрон. У якості монохроматора використовувався монокристал графіту.

З метою дослідження порошкових покриттів на зразках були підготовлені поперечні шліфи. Мікроструктуру покриттів досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа Quanta 200 3D. Пористість визначали металографічним методом з елементами якісного і кількісного аналізу геометрії пор за допомогою оптичного інвертованого мікроскопа Olympus GX51. Об'ємну частку пор і

Таблиця 2. Витрати компонентів горючої суміші

Витрата компонентів горючої суміші, [м3/год]					
Кисень	Пропан (70 %) + бутан (30 %)	Повітря			
2,7*/2,6**	0,66*/0,62**	1,7*/1,6**			
*Циліндрична камера згорання. **Кільцева камера згорання.					



Рис. 4. Зображення (РЕМ) поперечного шліфа покриття WC-Co-Cr

структурних складових визначали за допомогою програми ATLAS у декількох полях зору. Мікротвердість визначають відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007 на мікротвердомірі М-400 фірми LECO методом тесту Віккерса при навантаженні на індентор 300 г.

Дослідження зносостійкості покриття WC–Со– Сг проводили методами трибометрії за допомогою автоматизованої машини тертя (Tribometer, CSM Instruments), що управляється комп'ютером, за стандартною схемою випробування «кулька-диск» за стандартом ASTM G-99. Зразок встановлювали в тримачі, перпендикулярно плоскості зразка закріплювали стержень, на кінці якого знаходилася кулька діаметром 6 мм з оксиду алюмінію. Випробування проводили на повітрі (температура навколишнього середовища 30 °C, вологість 23,8 %) при навантаженні 10 Н і лінійній швидкості 10 см/с, шлях тертя становив 1000 м.

Результати дослідження та обговорення. Зображення на скануючому електронному мікроскопі за різного збільшення мікроструктури поверхні поперечного шліфа зразка з покриттям WC–Co–Cr наведено на рис. 4.

Товщина нанесених покриттів на зразках, що досліджувалися, складала близько 370 ± 10 мкм.



Рис. 5. Розподіл пор за розміром

ISSN 0005-111X АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №9, 2023

На зображеннях поперечного перерізу не спостерігалося ні тріщин, ні ділянок розшарування.

Дослідження структури показали, що покриття складаються з рівномірно розподілених карбідних частинок діаметром від 0,5 до 2 мкм і прошарків Со–Сг матриці з товщиною до 1 мкм. На мікрознімках покриття карбідні частинки представлені у вигляді світлих ділянок з кутастими краями і, відповідно, не проплавлених під час напилювання; сіра зона відповідає матриці, яка багата Со і містить Cr, W та C. Чорні ділянки — пори. Гістограма розподілу пор за розміром у покритті показана на рис. 5. Пористість покриття WC–Со–Сг складає ~0,2 %.

Для детальнішої ідентифікації фаз як у вихідному порошку, так і в покритті проведено рентгеноструктурний аналіз. Рентгеноструктурним аналізом вихідних порошків установлено, що у вихідному порошку WC–Co–Cr (марки AMPERIT[®]554.074, фракційного складу – 45 +15 мкм) WC — основна фаза (~ 80 %). Також виявлено до 12...14 % фази Co₃W₃C, присутність якої,



Рис. 6. Аналіз рентгенограми покриття: *1* – рентгенограма вихідного порошку WC–Co–Cr; *2* – рентгенограма покриття

41

очевидно, пов'язана з процесами, що відбуваються при виготовленні порошку (спікання насипного матеріалу й розмел спеченої губки). Інше - Со₆W₆C і Со-Сг металева матриця (рис. 6, *a*). Аналіз рентгенограми покриття (рис. 6, δ), нанесеного за допомогою БКДП, показав, що структуроутворення у даному випадку аналогічно процесам формування фаз, що мають місце при використанні інших методів високошвидкісного газотермічного напилювання [12]. Водночас з основною фазою WC (~60 %) в покритті з'являються нові фази W₂C (~18 %) і W (~6 %), наявність яких дозволяє зробити висновок, що відбуваються процеси розчинення й зневуглецьовування зерен WC. Під час напилювання високотемпературні продукти детонаційного згорання нагрівають порошок. При цьому механізм зневуглецьовування починається з плавлення металевої зв'язки Со-Сг, оскільки вона має більш низьку температуру плавлення, ніж карбіди WC. Після цього межі зерен WC починають розчинятися у розплавленому металі. В результаті вуглець реагує з киснем продуктів згорання. В момент удару об поверхню зразка частинки швидко холонуть. Із перенасиченого розчину навколо існуючих WC карбідних частинок у матриці формуються шари W₂C. Пік Со (як у порошку) не виявляється. Незважаючи на те, що твердість W₂C вища, ніж у WC, присутність більш крихкої фази W2C, що оточує частинки WC, призводить до зниження зносостійкості [6]. Крім того, збагачення зв'язуючої фази Со-Сг вольфрамом і вуглецем збільшує її твердість і призводить до зниження міцності. На рентгенограмі між кутами $2\Theta = 37...45^{\circ}$ присутнє гало, яке свідчить, що Co-Cr матриця може знаходитися в аморфно-нанокристалічному стані, що визначається високими швидкостями охолодження, властивими процесу напилювання із застосуванням БКДП.

Заміри мікротвердості проводили по всьому перерізу покриття. Отримана величина $HV_{0,3} = 10,4 \pm 1,2$ ГПа відповідає рівню твердості покриттів, одержаних різними високошвидкісними методами напилювання [4].

Інтенсивність зносу зразка і контртіла (кулькі) внаслідок проведених випробувань на тертя (рис. 7) оцінювалась за формулою:

$$W = V/(P \cdot l),$$

де W – інтенсивність зносу (мм³·н⁻¹·м⁻¹); V – об'єм видаленого матеріалу (мм³); P – навантаження (н); l – шлях тертя (м).

Випробування показали, що коефіцієнт тертя в середньому складає 0.527 ± 0.029 Інтенсивність зносу покриття $-1.125 \cdot 10^{-5}$ мм³·н⁻¹·м⁻¹, а контур тіла $-4.603 \cdot 10^{-6}$ мм³·н⁻¹·м⁻¹.

Приклади промислового застосування покриття. Високі фізико-механічні й експлуатаційні властивості покриттів з порошку WC–Co–Cr, що наносяться БКДП, були підтверджені на практиці. Наприклад, доцільно використовувати такі покриття для відновлення деталей запірної арматури: засувок, кульових кранів, клинових пробок тощо (рис. 8, *a*). Добре зарекомендували себе металокерамічні покриття при відновленні деталей целюлозно-паперової промисловості та поліграфії: скребки, ролики, тяглові й опорні плити, клапани та вали протяжки бумаги (рис. 8, δ).

Застосування металокерамічних покриттів не обмежується тільки сферою відновлення деталей. Отримані покриття також дозволяють розробляти принципово нові технічні рішення деталей машин ще на етапі їх проєктування. В якості прикладу на рис. 9 наведені деталі з легких сплавів зі зносостійким покриттям, напиленим БКДП. Покриття WC-Co-Cr на внутрішній поверхні корпусу з алюмінієвого сплаву роторно-поршневого двигуна дозволило значно збільшити його ресурс при зменшенні маси. В процесі проєктування легкомоторних летальних апаратів виконання цієї умови є одним із найважливіших. Використання твердосплавного покриття на титанових деталях бурової телеметрії в геодезії дало змогу захистити їх від інтенсивного гідроабразивного зносу й тим



Рис. 7. Параметри тертя: *1* – коефіцієнт тертя; *2* – температура зразка; *3* – переміщення контртіла в напрямку, перпендикулярному поверхні зразка, що випробовується



Рис. 8 Деталі з покриттям із порошку WC–Co–Cr: *a* – деталі запірної арматури; *б* – деталі целюлозно-паперової промисловості та поліграфії



Рис. 9. Деталі з легких сплавів: а – корпус роторно-поршневого двигуна; б – деталі бурової телеметрії

самим збільшити час між доволі затратними ремонтно-налагоджувальними роботами.

Розглянуто декілька прикладів застосування покриттів з твердого сплаву. Коло ж завдань, які вирішуються, доволі велике і постійно розширюється. Вдосконалюються і методи детонаційного нанесення, розробляються нові зразки обладнання, що відкриває нові перспективи і сфери застосування технології.

Висновки

З використанням багатокамерного детонаційного пристрою реалізовано високошвидкісне газотермічне нанесення покриттів із порошку WC–Co–Cr.

Рентгеноспектральний аналіз показав, що формування покриття з використанням БКДП супроводжується процесами часткового зневуглецьовування карбідів і утворення твердих, але крихких фаз. Що також характерно для інших HVOF і детонаційних методів нанесення покриттів, які широко застосовуються.

Твердість отриманих покриттів $HV_{0,3} = 10,4 \pm 1,2$ ГПа і низька пористість ~0,2 % дозволяють їх використовувати для запобігання абразивному, корозійному та ерозійному зносу поверхонь різних деталей машин та агрегатів.

Ефективність покриттів WC–Co–Cr, нанесених з використанням БКДП на деталі різних промислових пристроїв, підтверджена при їх практичному застосуванні.

Список літератури/References

- 1. Ang, A.S.M., Howse, H., Wade, S.A. et. al. (2016) Development of processing windows for HVOF carbide-based coatings. *J. of Thermal Spray Technology*, 25, 28–35. DOI: https://doi.org/10.1007/s11666-015-0318-z
- Berger, L.M. (2015) Application of hardmetals as thermal spray coatings. *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, 49, 350–364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029
- Sun, B., Fukanuma, H., Ohno, N. (2013) Investigation and Characterization of HVAF WC–Co–Cr Coatings and Comparison to Galvanic Hard Chrome Coatings. *Proceedings of the Int. Thermal Spray Conference 2013, May 13–15, 2013, Busan, Republic of Korea,* 389–394.
- Борисов Б.С., Астахов Е.А., Мурашов А.П. и др. (2015) Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления. *Автомат. сварка*, 10, 26–29. DOI: https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04

Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Murashov, A.P. et al. (2015) Investigation of structure and properties of thermal coatings of WC–Co–Cr system produced by high-velocity methods of spraying. *The Paton Welding J.*, **10**, 25-28 DOI: https://doi. org/10.15407/tpwj2015.10.04

- Singh, L., Chawla, V., Grewal, J.S. (2012) A review on detonation gun sprayed coatings. *J. of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(03), 243. DOI: http:// dx.doi.org/10.4236/jmmce.2012.113019
- Picas, J.A., Punset, M., Baile, M.T. et. al. (2009) Properties of WC-Co-Cr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes. *Plasma Processes and Polymers*, 6, 948–953. DOI: https://doi.org/10.1002/ppap.200932402
- Torkashvand, K., Gupta, M., Björklund, S. et. al. (2021) Influence of nozzle configuration and particle size on characteristics and sliding wear behavior of HVAF-sprayed WC-Co-Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127585. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127585
- Granata, M., Gautier di Confiengo, G., Bellucci, F. (2022) High-Pressure Cold Spray Coatings for Aircraft Brakes Application. *Metals*, 12(10), 1558. DOI: https://doi.org/10.3390/ met12101558
- Bamola, R., Ewell, T., Robinson, P. et. al. (2016) Coatings Deposited Using a Valve-Less Detonation System. Proceedings of the Int. Thermal Spray Conference 2016, May 10– 12, 2016, Shanghai, P.R. China, 127–131. DOI: https://doi. org/10.31399/asm.cp.itsc2016p0127
- Тюрін Ю.М., Колісніченко О.В. (2008) Спосіб детонаційного напилення покриття і прилад для його здійснення. Україна Пат. 83831. Туштіп, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) Method of detonation spraying of coatings and device for its realization. Pat. 8383, Ukraine.
 Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. (2017) Эф-
- Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. (2017) Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автомат. сварка*, **10**, 28–34. DOI: https://doi.org/10.15407/ as2017.10.03
 Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin, R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multicham-

ficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 18-23. DOI: https://doi.org/10.15407/as2017.10.03

12. Garfias Bulnes, A., Albaladejo Fuentes, V., Garcia Cano, I. et. al. (2020) Understanding the influence of high velocity thermal spray techniques on the properties of different anti-wear WC-based coatings. *Coatings*, **10** (12), 1157. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings10121157

PROPERTIES OF COATINGS, DEPOSITED BY MULTICHAMBER DETONATION DEVICE AND THEIR APPLICATION

O.V. Kolisnichenko, Yu.M. Tyurin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: okolis@i.ua

Coatings from WC–Co–Cr AMPERIT[®]554.074 powder were deposited using a multichamber detonation device. Investigations of coating microstructure and phase composition were conducted, using scanning electron microscopy and X-ray structural analysis. Dense coatings form at spraying by this method which consist of inclusions of tungsten carbide phases, uniformly distributed in Co–Cr matrix. Coating porosity is equal to ~0.2 %, microhardness is -10.4 ± 1.2 GPa. Experience of application of multichamber detonation device for deposition of wear-resistant coatings from WC–Co–Cr powder is shown, both at the stage of part reconditioning and at design of components of various mechanisms. 12 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: thermal spraying, detonation device, hard alloy, coating, microstructure, wear, porosity, hardness, industrial application

Надійшла до редакції 18.07.2023



«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» – 2023

Найважливіша зварювальна виставка в світі «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» відбулася в період з 11 по 15 вересня 2023 р. в конференц-центрі Messe

Essen. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона прийняв участь в роботі виставки на стенді 8В29.1. Звіт фахівців ІЕЗ за результатами роботи виставки буде надруковано в журналі «Автоматичне зварювання» №11, 2023.

