

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ З КАРБІДІВ ВОЛЬФРАМУ ТА ХРОМУ ПРИ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВОМУ НАПИЛЕННІ З КУМУЛЯЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ В БАГАТОКАМЕРНОМУ ПРИСТРОЇ

Ke Liming, П. Стухляк, В. Мудріченко

Науково-дослідний інститут зварювальних технологій ім. Є.О. Патона провінції Чжецзян, 233 Yonghui Road, Xiaoshan District, Hangzhou City, Zhejiang Province, China. E-mail: stukhlyakpetro@gmail.com

В роботі наведено результати досліджень структури покриттів, отриманих з порошків на основі карбідів хрому ($75\text{Cr}_3\text{C}_2+25\text{NiCr}$) (мас. %) та вольфраму ($\text{WC}+12\text{Co}$) (мас. %) детонаційно-газовим напиленням з кумуляцією енергії в багатокамерних пристроях. Встановлено, що дана технологія забезпечує отримання покриттів високої щільності товщиною 200...500 мкм з пористістю менше 1 % та мікротвердістю $HV_{0.05} = 1235 \pm 80$ ($\text{WC}+12\text{Co}$) (мас. %) та 1547 ± 150 ($75\text{Cr}_3\text{C}_2+25\text{NiCr}$) (мас. %). Характерною особливістю даних покриттів є утворення субструктури розміром 1...8 мкм і зміцнюючих фаз карбідного типу з розмірами 100...800 нм, що рівномірно розподілені у об'ємі матеріалу покриття. Встановлено, що високий рівень структурного зміцнення вказаних покриттів забезпечується формуванням матеріалу з дисперсною субзеренною структурою при рівномірному розподілі частинок зміцнюючих фаз у ньому. Бібліогр. 27, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: захисні покриття, багатокамерне кумулятивно-детонаційне напилення, мікроструктура, мікротвердість, субструктура, структурне зміцнення

Вступ. Покращення експлуатаційної надійності механізмів нафтоперекачуючого обладнання технологічного устаткування передбачає використання зносостійких покриттів, що працюють при підвищених температурах. Перспективним у даному напрямку досліджень є застосування матеріалів на основі карбідів хрому та вольфраму. Формування таких композитів та покриттів на їх основі здійснюють газотермічним напиленням [1–3], у тому числі високопродуктивним методом детонаційного напилення при швидкості процесу, що перевищує швидкість звуку у кілька разів [4–7].

У порівнянні з іншими методами отримання покриттів [8–12], такими як газополуменевий, плазмовий або лазерні та гібридні технології – метод багатокамерного детонаційного напилення забезпечує отримання кращого технологічного ефекту формування покриттів за рахунок реалізації ефекту кумуляції енергії у спеціально сконструйованих камерах [6, 7]. У даному випадку підвищується тиск імпульсного газового потоку, що зумовлює збільшення швидкостей продуктів детонаційного згоряння у соплі (1800 м/с) та швидкості транспортування порошку (1200...1600 м/с) до поверхні для формування покриттів. Цей метод дозволяє отримувати якісні безпористі наноструктуровані покриття, в тому числі на основі карбідів, з високими адгезійними та когезійними характеристиками та щільністю [13–16].

Цікавим з наукової та практичної точки зору є використання дисперсних порошкових матеріалів WC-Co , $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, що добре себе зарекомендували при формуванні захисних покриттів поверхонь деталей, вузлів механізмів та машин різного функційного призначення. Вибір вказаних матеріалів зумовлено температурними умовами їх експлуатації при 500...520 та 820...870 °С, відповідно, в умовах ерозійного, кавітаційного зношування та при динамічних знакозмінних навантаженнях. Формування матеріалів на основі WC та Cr_3C_2 з вмістом Co та Ni зумовлює виникнення в матеріалі покриття нанокристалічної структури та зон з некристалічною структурою [3, 17, 18]. Це дозволяє підвищити зносостійкість, покращити тріщиностійкість за рахунок зміцнення на межі поділу фаз та підвищити міцність адгезійних з'єднань покриттів з основою.

Застосування вказаних матеріалів не обмежується нафтотранспортним обладнанням. Особливо перспективним є використання таких захисних покриттів в гірничодобувній промисловості, для обладнання при бурінні нафтових свердловин, сільськогосподарській техніці та для металорізальних інструментів, ремонту обладнання шляхом відновлення зношуваних поверхонь. Перспективним є використання для всіх видів клапанів, водяних турбін, валків для прокату ли-

стової сталі, валів тощо для захисту їх робочих поверхонь.

На даний час недостатньо уваги приділено дослідженням особливостей формування зазначених покриттів, отриманих з використанням методу детонаційного багатокамерного наплення та визначенню їхніх структурно-фазових характеристик, які впливають на їх службові властивості.

Метою роботи є дослідження структури покриттів з порошків різних систем WC-Co; Cr_3C_2 -NiCr, що отримані методом багатокамерного детонаційного наплення та впливу структурно-фазових характеристик на показники твердості.

Матеріали та методики досліджень. Покриття для проведення досліджень наносили в Науково-дослідному інституті зварювальних технологій ім. Є.О. Патона в провінції Чжецзян (КНР) на роботизованому комплексі детонаційно-газового наплення, розробленому в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (рис. 1).

Наплення покриттів здійснювали за допомогою багатокамерного детонаційного пристрою (рис. 1), який включає: спеціально спрофільовану форкамеру, що дозволяє значно скоротити ділянку переходу режиму горіння до детонації; основну циліндричну камеру, що служить для розвитку процесу детонації, створення основного газодинамічного напору продуктів детонаційного згоряння, які прискорюють і нагрівають порошок; кільцеву камеру, призначену для створення додаткового газодинамічного потоку, який «підпирає» в

циліндричному стволі продукти детонації від другої (основної) камери, і розширює зону нагрівання та прискорення порошку. Шляхом застосування такої конструкції багатокамерного детонаційного пристрою забезпечується інтенсифікація детонаційного режиму горіння, кумулювання енергії детонації та створення ефекту перестискання детонаційної хвилі [6, 7].

Для наплення покриттів застосовували порошки: WC+12Co (мас. %) (AMPERIT®518.074); $75\text{Cr}_3\text{C}_2$ +25NiCr (мас. %) (AMPERIT®585.003) із розміром частинок 15...45 мкм. Перед напленням проводили струменево-абразивну обробку поверхні матеріалу основи (Ст.3) електрокорундом білим марки F16 (фракція 1...2 мм). Режим наплення: швидкість переміщення гармати 1500 мм/хв; співвідношення довжина/діаметр (l/d) ствола гармати = 325/16 мм; витрати кисню – O_2 = 41 л/хв (1 камера), O_2 = 35 л/хв (2 камера); у кожній камері витрати повітря – 11 л/хв та C_3H_8 – 11 л/хв; витрати порошку 1600 г/год. Дистанція наплення (відстань від сопла) багатокамерного пристрою до поверхні сталевих основи складала 60...70 мм. Покриття № 1 (WC+12 Co) наплювали у три проходи, № 2 (WC+12Co) та № 3 ($75\text{Cr}_3\text{C}_2$ +25NiCr) – у сім проходів.

Дослідження мікроструктури покриттів проводили із застосуванням світлової мікроскопії (мікроскоп Zeiss Axio Imager M2m). Визначали товщину покриттів (δ), мікротвердість (HV), розміри структурних складових – ширину ламелей (h_λ) та їх об'ємну частку (V_λ , %), пористість (Π , %)

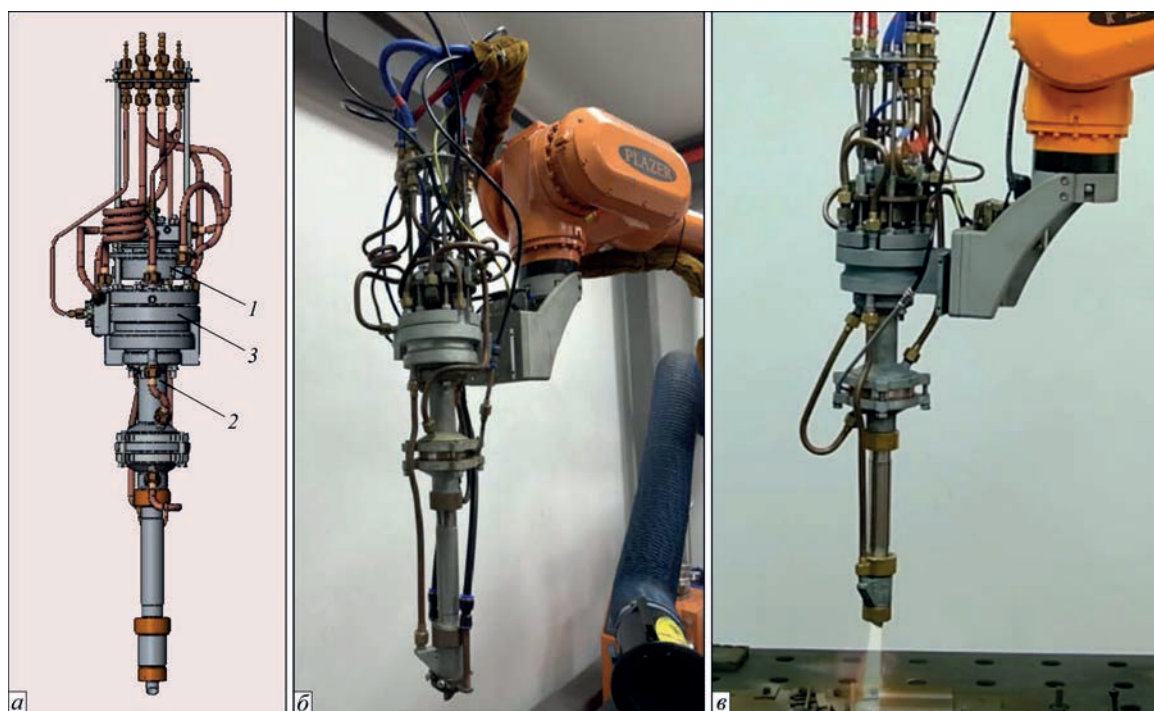


Рис. 1. Вигляд багатокамерного детонаційного пристрою (а, б) та процес детонаційно-газового наплення (в) з кумуляцією енергії в багатокамерному пристрої: 1 – форкамера; 2 – основна камера; 3 – циліндрична камера

(табл. 1). Пористість покриттів та об’ємну частку ламелей визначали за допомогою металографічного програмного забезпечення із застосуванням програмного пакету «Pro Imaging» (Zeiss Axio Imager M2m). Мікротвердість вимірювали на приладі VN1102 (США) при навантаженні 0,5 кг.

Результати досліджень. Із вихідних порошків отримано три типу покриттів: № 1 – з порошку (WC+12Co) товщиною $\delta = 200$ мкм (рис. 2, а); № 2 – (WC+12Co) товщиною $\delta = 520$ мкм (рис. 3, а); № 3 – (75Cr₃C₂–25NiCr) товщиною $\delta = 500$ мкм (рис. 4, а). Матеріали покриттів відрізняються за об’ємною часткою ламелей (табл. 1).

Покриття з порошку (WC+12Co) характеризується об’ємною часткою ламелей (V_{λ}) у матриці 5...10 % (покриття № 1) та 10...15 % (покриття № 2), відповідно (рис. 2, б; рис. 3, б). Напилення Cr₃C₂–NiCr забезпечує ламелізацію з $V_{\lambda} = 25...30$ % (рис. 4, б).

При застосуванні порошку Cr₃C₂–NiCr в матеріалі покриття № 3 ширина ламелей $h_{\lambda} = 1...20$ мкм

(табл. 2). При цьому спостерігали формування зеренної структури при $D_z = 10...20$ мкм (рис. 4, б) та субструктури розміром $d_c = 2...8$ мкм (рис. 4, в, з) з мікротвердістю $HV_{0,5} = 1417 \pm 67$ МПа (по товщині покриття) та $HV_{0,5} = 1547 \pm 150$ МПа (по довжині середньої зони покриття) (табл. 2). Також характерна наявність частинок дисперсних фаз розміром $d_q = 0,15...0,3$ мкм при їх рівномірному розподілі на відстанях $\lambda_q = 0,2...0,45$ мкм (рис. 4, в).

У разі отримання покриття № 2 із порошку (WC+12Co) ширина ламелей $h_{\lambda} = 20...30$ мкм, розмір зерен складає $D_z = 10...20$ мкм при мікротвердості $HV_{0,5} = 1235 \pm 80$ (по товщині покриття) та $HV_{0,5} = 1209 \pm 80$ МПа (по довжині середньої зони покриття), табл. 2. Також спостерігали формування субструктури розміром $d_c = 1,2...3,0$ мкм (рис. 3, в) при наявності частинок дисперсних фаз розміром $d_q = 0,15...0,45$ мкм на відстанях $\lambda_q = 0,25...0,6$ мкм (рис. 3, з).

Для матеріалу покриттів № 1, що напилено при використанні порошку (WC–Co) характерно формування зеренної та субзеренної структур з розмірами $D_z = 10...20$ мкм (рис. 2, б) та $d_c = 2...5$ мкм (рис. 2, в, з) з мікротвердістю $HV_{0,5} = 1120 \pm 100$ МПа (по товщині) та $HV_{0,5} = 1184 \pm 66$ МПа (по довжині середньої зони покриття), табл. 1, 2. Розмір частинок дисперсних фаз $d_q = 0,1...0,8$ мкм, відстань між ними $\lambda_q = 0,16...1,0$ мкм (рис. 2, з).

Таблиця 1. Структурні параметри покриттів

Покриття	δ , мкм	$HV_{0,5}$		V_{λ} , %
		по товщині	по довжині	
№ 1 (WC–Co)	200	1120 ± 100	1184 ± 66	5...10
№ 2 (WC–Co)	520	1235 ± 80	1209 ± 80	10...15
№ 3 (Cr ₃ C ₂ –NiCr)	500	1417 ± 67	1547 ± 150	25...30

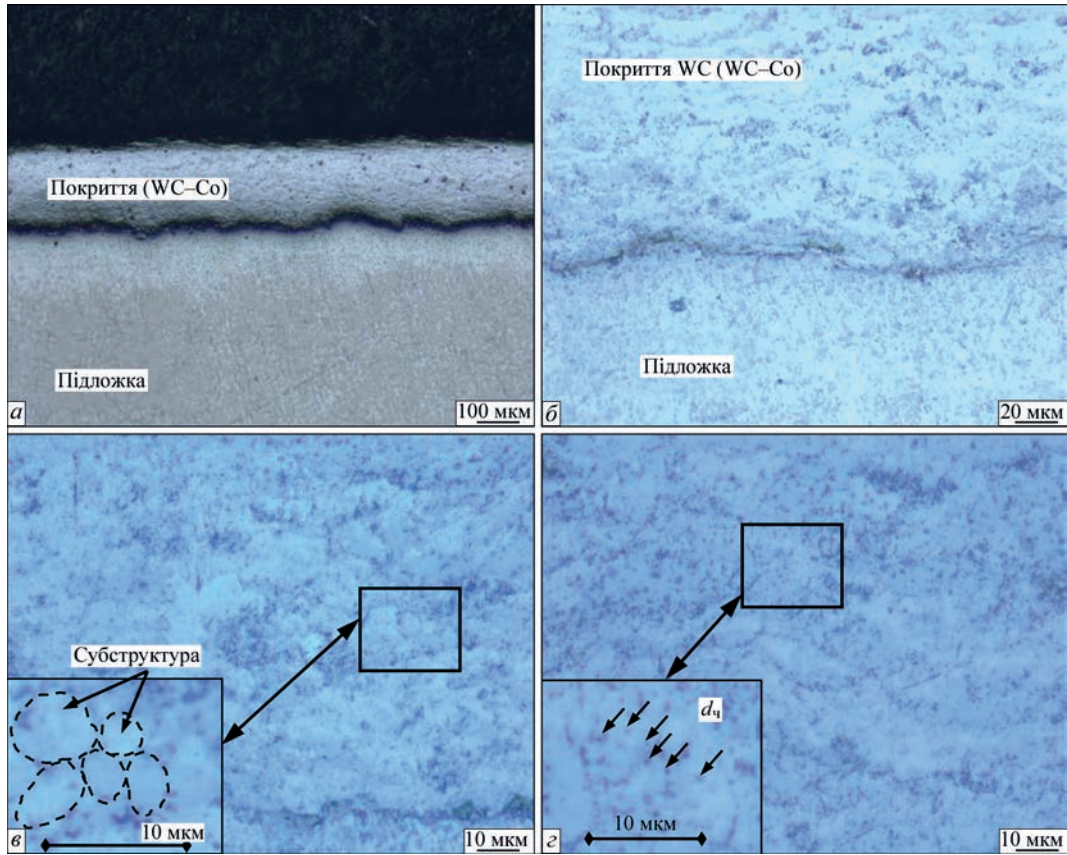


Рис. 2. Мікроструктура покриття № 1 з порошку(WC+12Co) (а – ×100; б – ×500; в, з – ×1000)

Таблиця 2. Мікроструктурні параметри матеріалу покриттів

Покриття	Структурні параметри				
	h_z , мкм	D_z , мкм	d_c , мкм	d_q , мкм	λ_q , мкм
№ 1 (WC–Co)	20...30	10...40	2...5	0,15...0,45	0,25...0,6
№ 2 (WC–Co)	8...20	10...20	1,2...3	0,1...0,8	0,16...1,0
№ 3 (Cr_3C_2 –NiCr)	2...20	10...20	2...8	0,15...0,3	0,2...0,45

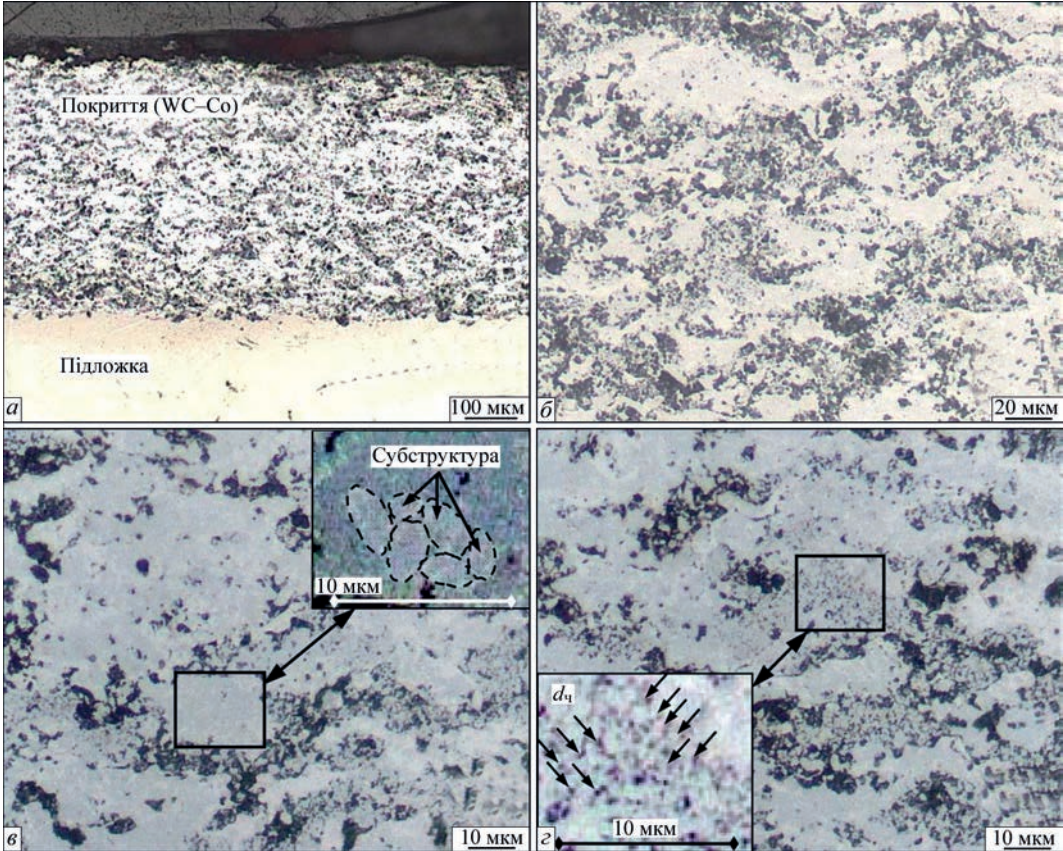


Рис. 3. Мікроструктура покриття № 2 з порошку WC–Co ($a - \times 100$; $b - \times 500$; $в, г - \times 1000$)

Основними фазами, що утворюються у матеріалі покриттів з порошків на основі карбіду вольфраму є утворення WC та W_2C [19, 20].

Таким чином, металографічними дослідженнями структури матеріалів покриттів, що отримані методом багатокамерного детонаційного напилення порошків на основі карбідів вольфраму та хрому, встановлено наступне. Покриття характеризуються пористістю менше 1 %, відрізняються мікротвердістю та ламелізацією. Рівень мікротвердості у матеріалі покриттів без значних градієнтів. Практично однакова мікротвердість у покриттях різної товщини (№ 1 та № 2), що напилено з порошку на основі WC (рис. 5).

Найбільш високу мікротвердість спостерігали у покритті Cr_3C_2 –NiCr (рис. 5). При детальних вимірюваннях $HV_{0,5}$ різних структурних складових, таких як нерозплавлені частинки (рис. 6, a), світлі (рис. 6, b) та темні ламелі (рис. 6, $в$) виявлено, що їх мікротвердість відрізняється: $HV_{0,5} = 579...1147$ (нерозплавлені частинки); $HV_{0,5} = 826...1776$ (світ-

лі ламелі); $HV_{0,5} = 1039...1573$ (темні ламелі). Це свідчить про активність процесу фазоутворення при формуванні покриття. Застосування порошку Cr_3C_2 –NiCr для напилення покриття зумовлює наявність частинок фаз Cr_3C_2 (30...50 %) та 30...40 % ($\text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) [13, 21–23].

Порівняно з покриттям Cr_3C_2 –NiCr в покриттях з порошку WC–Co мікротвердість знижується в середньому у 1,2 рази. При напиленні порошку (WC–Co) у матеріалі покриття № 1 (товщиною $\delta = 200$ мкм) ширина ламелей та розмір зерен збільшуються у 2,2 рази, при укрупненні субструктури у 2,6 рази.

Проведені вимірювання розмірів та розподілу частинок фаз у матриці покриттів. Використано програмне забезпечення до металографічного мікроскопу Zeiss Axio Imager M2m. При аналізі фрагментів мікроструктури що отримано при збільшеннях $\times 1000$ (рис. 2, $г$; рис. 3, $г$; рис. 4, $в$) далі проводили наступне збільшення зображень у 10...15 разів.

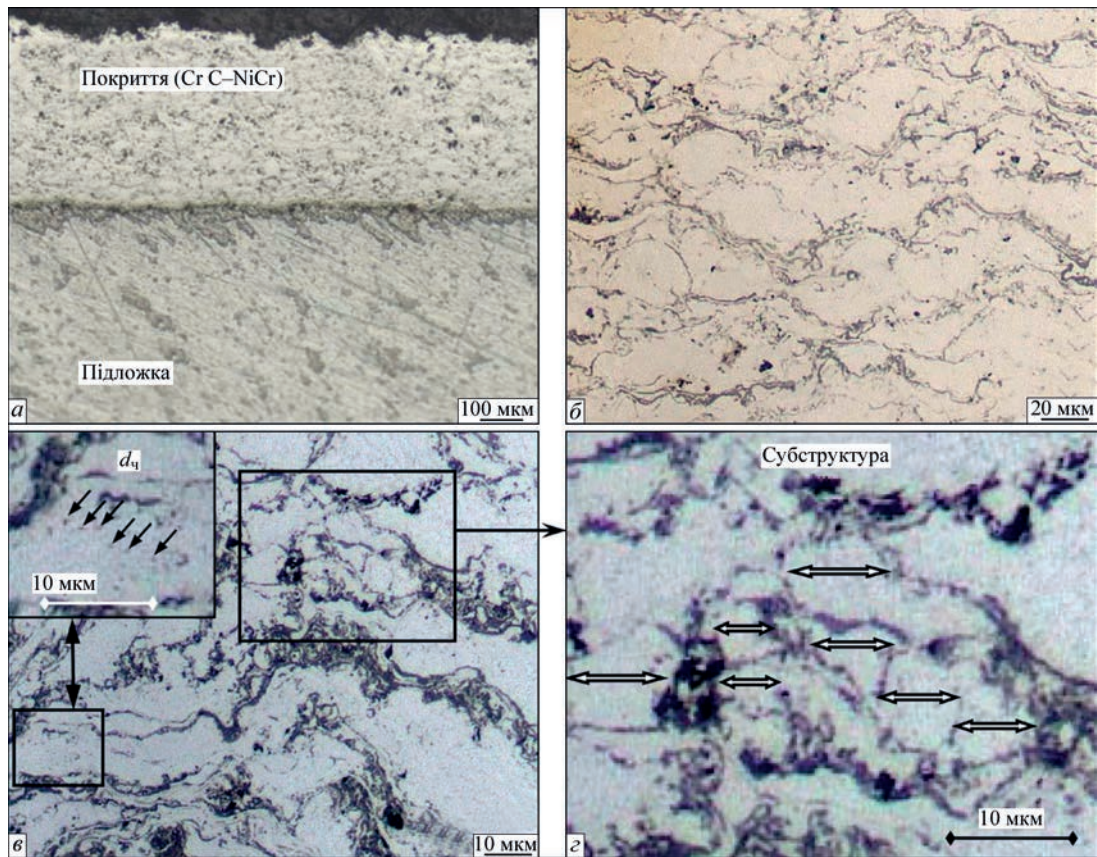


Рис. 4. Мікроструктура покриття № 3 з порошку ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) ($a - \times 100$; $b - \times 500$; $c, d - \times 1000$; z – укрупнення фрагмента рис. 4, e).

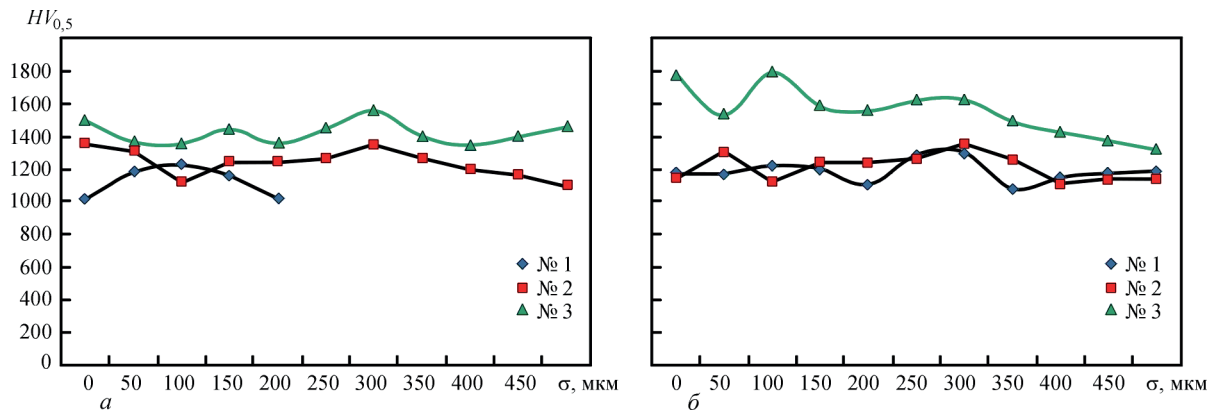


Рис. 5. Зміна мікротвердості по товщині (δ) покриттів (a) та довжині (L) середньої зони покриттів (b), що отримано з порошків WC-Co (№ 1, № 2) та $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{+NiCr}$ (№ 3)

У разі використання порошку ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) розмір частинок дисперсних фаз $d_q = 150 \dots 300$ нм у матриці покриттів незначно менший порівняно з покриттями № 1 (WC-Co), де $d_q = 150 \dots 450$ нм (табл. 2). Також зменшується і відстань (λ_q) між ними, що характеризує підвищення їх об'ємної частки в матриці покриття до 30 %. Але у покритті № 2 (WC-Co) при мінімальних розмірах дисперсних фаз ($d_q = 100$ нм) та відстанях між ними ($\lambda_q = 160$ нм) їх об'ємна частка в матриці покриття зростає до 43 %. Це буде забезпечувати високий рівень дисперсійного зміцнення матеріалу покриття [13, 15, 21–24].

Слід зазначити, що характерною особливістю отриманих покриттів є наявність частинок дисперсних фаз (рис. 2, z ; рис. 3, z ; рис. 4, e) розміром від $100 \dots 150$ до $300 \dots 800$ нм при формуванні субструктури (рис. 2, e ; рис. 3, e ; рис. 4, z).

З метою вивчення впливу структури на механічні характеристики матеріалу покриттів аналітично оцінено показник структурного зміцнення ($\Sigma \Delta \sigma_i$) з врахуванням внеску кожного з структурних параметрів (розмірів ламелей та зерен – D_3 , субзерен – d_c , частинок дисперсних фаз – d_q та відстаней між ними λ_q) [21–24]. Проведено розрахунок складових структурного зміцнення: σ_0 ; σ_3 ; σ_c ; $\sigma_{d.3}$ (табл. 3,

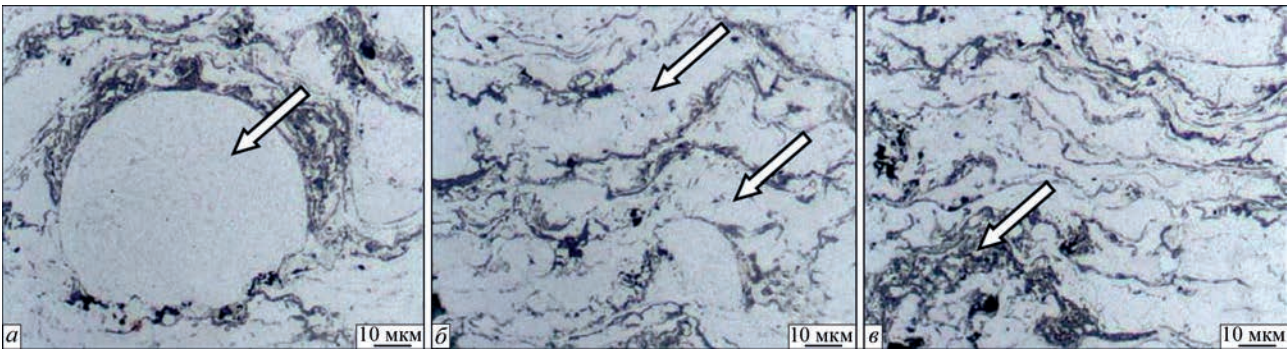


Рис. 6. Різні структурні складові у покритті № 3 ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$): нерозплавлені частинки (а), світлі (б) та темні ламелі (в)

Таблиця 3. Розрахункові показники структурного зміцнення матеріалу покриттів

Покриття	Структурне зміцнення				
	$\Delta\sigma_0$	$\Delta\sigma_3$	$\Delta\sigma_c$	$\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$	$\Sigma\Delta\sigma_{\text{т}}$ (середнє)
№ 1 (WC–Co)	46	17...5* 128...181**	291...460	1341...1849	2208
№ 2 (WC–Co)	60	10...16* 135...192**	375...593	811...2159	2206
№ 3 ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$)	34	32...3* 75...150**	230...460	750...1812	1809

Примітка. *Ламелі; **зерно.

рис. 7). Подібний підхід був також апробований і на інших матеріалах, де були отримані значимі результати відносно експериментальних показників механічних властивостей у структурі різних матеріалів – сталей різного класу, алюмінієвих та титанових сплавів, монокристалів вольфраму, захисних покриттів, тощо [25–27].

В результаті встановлено, що середні інтегральні значення зміцнення ($\Sigma\Delta\sigma_{\text{т}}$) для покриттів (WC–Co) № 1 (товщиною $\delta = 200$ мкм) та № 2 ($\delta = 500$ мкм) складають $\Sigma\Delta\sigma_{\text{т}} = 2208$ МПа та $\Sigma\Delta\sigma_{\text{т}} = 2206$ МПа, відповідно (рис. 7, табл. 3). Незначне зменшення $\Sigma\Delta\sigma_{\text{т}}$ спостерігається у матеріалі покриття ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$). В усіх випадках максимальний внесок (до 70 %) у сумарне значення

зміцнення вносить зміцнення матриці покриттів за рахунок дисперсних частинок фаз нанорозмірного типу (дисперсійне зміцнення по Оровану): $\Delta\sigma_{\text{д.з.}} = 1595$ МПа (покриття № 1); $\Delta\sigma_{\text{д.з.}} = 1485$ МПа (№ 2); $\Delta\sigma_{\text{д.з.}} = 1281$ МПа (№ 3). При цьому внесок зеренного та субзеренного зміцнень для досліджуваних покриттів становить 8...9 % ($\Delta\sigma_3$) та 17...22 % ($\Delta\sigma_c$), відповідно.

Таким чином, високий рівень структурного зміцнення покриттів з порошків на основі WC та Cr_3C_2 при використанні методу багатокамерного кумулятивно-детонаційного напилення забезпечується переважно за рахунок дисперсійного зміцнення частинками фаз при рівномірному їх розподілі у матеріалі покриттів.

Висновки

Виявлено особливості структури покриттів з порошків (WC+12Co) (мас. %) та ($75\text{Cr}_3\text{C}_2+25\text{NiCr}$) (мас. %), нанесених на сталеву поверхню методом багатокамерного кумулятивно-детонаційного напилення. Отримано покриття високої щільності, товщиною 200...500 мкм з пористістю менше 1 %, з безградієнтним рівнем мікротвердості. Характерною особливістю мікроструктури покриттів, яка утворюється при багатокамерному кумулятивно-детонаційному напиленні, є формування дисперсної субструктури розміром 1...8 мкм і зміцнюючих фаз карбідного типу розміром 100...800 нм, що рівномірно розподілені по об’єму матеріалу покриттів. Наявність такої субмікронної та нанорозмірної субструктури карбідних фаз забезпечує досягнення підвищених значень мікротвердо-

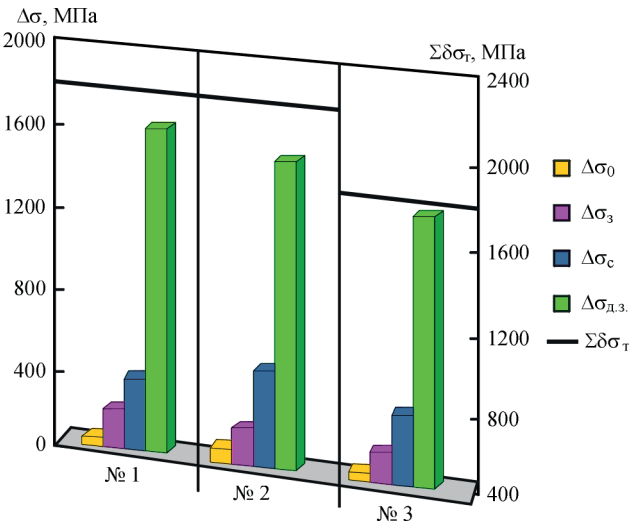


Рис. 7. Гістограми внеску середніх величин структурного зміцнення покриттів з порошків: № 1, № 2 – (WC–Co); 3 – ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$): тертя ґратки ($\Delta\sigma_0$), зеренного ($\Delta\sigma_3$), субзеренного ($\Delta\sigma_c$), дисперсійного ($\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$) зміцнень

сті покриттів $HV_{0,5} = 1014...1352$ для (WC+12Co) (мас. %) і $HV_{0,5} = 1256...1785$ для (75Cr₃C₂+25NiCr) (мас. %).

Встановлено, що високий рівень структурного зміцнення отриманих покриттів забезпечується за рахунок дисперсійного зміцнення субмікронними і нанорозмірними карбідними фазами фаз при рівномірному їх розподілі у матеріалі покриттів.

Список літератури

1. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Коржик В.М. (2007) *Інженерія поверхні*. Київ, Наукова думка.
2. Коржик В.Н., Лихошва В.П., Ткаченко Э.А. (2014) *Упрочнение и реновации инженерией поверхности*. Киев, Наш формат.
3. Borisov, Yu.S., Korzhyk, V.N. (1995) Amorphous gas-thermal coatings: theory and experimental data. Thermal plasma and new materials technology. Cambridge Interscience Publ. 2, 255–269.
4. Коржик В.Н., Астахов Е.А., Чернышов А.В. (1990) *Детонационное напыление аморфных и микрокристаллических покрытий*. Киев, Знание.
5. Борисов Ю.С., Коржик В.Н., Астахов Е.А., Чернышов А.В. (1993) Влияние состава детонирующей среды на формирование аморфно-кристаллических покрытий. *Автоматич. сварка*, 6, 83–93.
6. Барикін Г.Ю., Коржик В.М., Чернышов О.В. (1995) *Пристрій для детонаційного напылення покриттів*. Патент України.
7. Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin, R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, 10, 18–23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.10.03>.
8. Hryhorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Y. et al. (2020) Formation of microstructure of plasma-arc coatings obtained using powder wires with steel skin and B4C + (Cr, Fe)7C3 + Al filler. *Metallfizika i Noveishie Tekhnol.*, 42(9), 1265–1282. <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i09/1265.html>
9. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Y. et al. (2019) Structurization of coatings in the plasma arc spraying process using B₄C+(Cr, Fe)₇C₃-cored wires. *Powder Metall. Met. Ceram.* 58(5/6), 312–322.
10. Kuzmych-Ianchuk, I.K., Borisov, Y.S., Bernatskyi, A.V. (2014) Laser-Microplasma Reactive Powder Spraying of Titanium Coatings with Nitride Phases. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 276–281. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.276>
11. Shelyagin, V., Krivtsun, I., Borisov, Yu. et al. (2005) Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, 8, 44–49.
12. Imbirovych, O., Povstyanoy, O., Zaleta, S., Shymchuk, O., Priadko (2021) The Influence of Synthesis Regimes on Operational Properties of Oxide Ceramic Coatings on an Aluminum Alloy. In: Ivanov V. et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. DSMIE-2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 536–545. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46
13. Коржик В.Н., Берднікова О.М., Кушнарьова О.С. та ін. (2023) Особливості структури матеріалів покриттів Cr₃C₂-NiCr і Ni-Cr, сформованих методом багатокammerного детонаційного напылення. *Порошкова металургія*, 11/12.
14. Korzhyk, V., Berdnikova, O., Stukhliak, P. et al. (2024) Strength and Crack Resistance Structural Criteria of Composite Coatings Produced by the Method of Multi-Chamber Detonation Spraying. *Solid State Phenomena*, 355, 123–129 <https://doi.org/10.4028/p-qjM7yA>
15. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. et al. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_11

16. Оликер В.Е., Сыроватка В.Л., Тимофеева И.И. (2005) Влияние свойств порошков алюминидов титана и условий детонационного напыления на фазо- и структурообразование покрытий. *Порошковая металлургия*, 9/10, 74–84.
17. Куницкий Ю.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. (1988) *Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике*. Киев, Техника.
18. Шпак А.П., Коржик В.Н., Куницкий Ю.А., Шматко О.А. (2004) *Материалы с нано- и квазикристаллической структурой*. Киев, Академперіодика.
19. Haoqiang Zhang, Hao Liu, Chengxiang Ren et al. (2023) Microstructure and Properties of the Stellite6/WC Composite Coatings Prepared by Laser Cladding. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 10(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00228-3>
20. Baijiang, Chen, Mengkuo, Xu. (2020) Preparation and Performance Analysis of Micro-Nano Composite Coatings Reinforced with WC Particles. *Materials Research Express*, 11(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad2888>
21. Titkov, Y., Berdnikova, O., Tyurin, Y. et al. (2020) Effect of Structure on the Properties of Composite CrC+NiCr Coatings. *Springer Proceedings in Physics*, 240, 151–159.
22. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. et al. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_11
23. Sydorets, V., Berdnikova, O., Polovetskyi, Y. et al. (2020) Modern techniques for automated acquiring and processing data of diffraction electron microscopy for nano-materials and single-crystals. *Materials Science Forum*, 992 MSF, 907–915.
24. Berdnikova, O.M., Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. et al. (2022) Nanoscale Structures of Detonation-Sprayed Metal-Ceramic Coatings of the Ni-Cr-Fe-B-Si System. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 20(1), 97–109.
25. Berdnikova, O., Sydorets, V., Alekseenko, T. (2014) Structure and properties of laser-welded joints from high-strength steels. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 240–245. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.682.240. <http://doi.org/www.scientific.net/AMM.682.240>
26. Berdnikova O., Kushnarova O., Bernatskyi A. et al. (2020) Structure Peculiarities of the Surface Layers of Structural Steel under Laser Alloying. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 02IT01-1-02IT01-4. <http://doi.org/10.1109/nap51477.2020.9309615>
27. Berdnikova O., Kushnarova O., Bernatskyi A. et al. (2021) Structure features of surface layers in structural steel after laser-plasma alloying with 48(WC-W2C)+48Cr+4Al powder. *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 01–04. <https://doi.org/10.1109/NAP51885.2021.9568516>

References

1. Yushchenko K.A., Borisov Yu.S., Kuznetsov V.D., Korzhyk, V.M. (2007) *Surface Engineering*. Kyiv, Scientific Thought.
2. Korzhyk, V.N., Likhoshva V.P., Tkachenko E.A. (2014) *Strengthening and renovation by surface engineering*. Kyiv, Nash Format.
3. Borisov, Yu.S., Korzhyk, V.N. (1995) Amorphous gas-thermal coatings: theory and experimental data Thermal plasma and new materials technology. Cambridge Interscience Publ. 2, 255–269.
4. Korzhyk, V.N., Astakhov E.A., Chernyshov A.V. (1990) *Detonation spraying of amorphous and microcrystalline coatings*. Kyiv, Znanie.
5. Borisov, Yu.S., Korzhyk, V.N., Astakhov E.A., Chernyshov A.V. (1993) Influence of the composition of the detonating medium on the formation of amorphous-crystalline coatings. *Автоматич. сврка*, 6, 83–93. [in Russian]
6. Barikin G.Yu., Korzhyk, V.N., Chernishov O.V. (1995) Device for detonation filing of coatings. Patent of Ukraine.
7. Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin, R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber

- detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 18–23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.10.03>.
8. Hryhorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Y. et al. (2020) Formation of microstructure of plasma-arc coatings obtained using powder wires with steel skin and B4C + (Cr, Fe)7C3 + Al filler. *Metallofizika Noveishie Tekhnol.* Link is Disabled. **42**, 9, 1265–1282. <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v42/i09/1265.html>
9. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Y. et al. (2019) Structurization of coatings in the plasma arc spraying process using B4C+(Cr, Fe)7C3-cored wires. *Powder Metall. Met. Ceram.* **58**, 5/6, 312–322.
10. Kuzmych-Ianchuk, I.K., Borisov, Y.S., Bernatskyi, A.V. (2014) Laser-Microplasma Reactive Powder Spraying of Titanium Coatings with Nitride Phases. In *Applied Mechanics and Materials*, **682**, 276–281. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.276>
11. Shelyagin, V., Krivtsov, I., Borisov, Yu. et al. (2005) Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies. *The Paton Welding J.*, **8**, 44–49.
12. Imbriovych, O., Povstyanoy, O., Zaleta, S., Shymchuk, O., Priadko (2021) The Influence of Synthesis Regimes on Operational Properties of Oxide Ceramic Coatings on an Aluminum Alloy. In: Ivanov V. et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 536–545. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46
13. V.M. Korzhyk, O.M. Berdnikova, P.D. Stukhliak, O.S. Kushnarova, O.V. Kolisnichenko, I.O. Skachkov, Ye.P. Titkov (2023) Structural features of the Cr3C2–NiCr and Ni–Cr–Fe–B–Si coatings produced by multichamber detonation spraying. *Powder metallurgy*, **11/12**.
14. Korzhyk, V., Berdnikova, O., Stukhliak, P. et al. (2024) Strength and Crack Resistance Structural Criteria of Composite Coatings Produced by the Method of Multi-Chamber Detonation Spraying. *Solid State Phenomena*, **355**, 123–129 <https://doi.org/10.4028/p-qjM7yA>
15. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. et al. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_11
16. Olikier V.E., Syrovatka V.L., Timofeeva I.I. (2005) Effect of titanium aluminide powder properties and detonation spraying conditions on phase and structure formation of coatings. *Powder Metallurgy*, **9/10**, 74–84.
17. Kunitsky Yu.A., Korzhik V.N., Borisov Yu.S. (1988) *Non-crystalline metallic materials and coatings in engineering*. Kyiv, Tekhnika.
18. Shpak A.P., Korzhyk V.N., Kunitsky Yu.A., Shmatko O.A. (2004) *Materials with nano- and quasi-crystalline structure*. Kyiv, Akadempriodika.
19. Haoqiang Zhang, Hao Liu, Chengxiang Ren et al. (2023) Microstructure and Properties of the Stellite6/WC Composite Coatings Prepared by Laser Cladding. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, **10(4)**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00228-3>
20. Baijiang, Chen, Mengkuo, Xu. (2020) Preparation and Performance Analysis of Micro-Nano Composite Coatings Reinforced with WC Particles. *Materials Research Express*, **11(2)**. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad2888>
21. Titkov, Y., Berdnikova, O., Tyurin, Y. et al. (2020) Effect of Structure on the Properties of Composite CrC+NiCr Coatings. *Springer Proceedings in Physics*, **240**, 151–159.
22. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. et al. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_11
23. Sydorets, V., Berdnikova, O., Polovetskyi, Y. et al. (2020) Modern techniques for automated acquiring and processing data of diffraction electron microscopy for nano-materials and single-crystals. *Materials Science Forum*, 992 MSF, 907–915.
24. Berdnikova, O.M., Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. et al. (2022) Nanoscale Structures of Detonation-Sprayed Metal–Ceramic Coatings of the Ni–Cr–Fe–B–Si System. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20(1)**, 97–109.
25. Berdnikova, O., Sydorets, V., Alekseenko, T. (2014) Structure and properties of laser-welded joints from high strength steels. *Applied Mechanics and Materials*, **682**, 240–245. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.682.240. <http://doi.org/www.scientific.net/AMM.682.240>
26. Berdnikova O., Kushnarova O., Bernatskyi A. et al. (2020) Structure Peculiarities of the Surface Layers of Structural Steel under Laser Alloying. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 02IT01-1-02IT01-4. <http://doi.org/10.1109/nap51477.2020.9309615>
27. Berdnikova O., Kushnarova O., Bernatskyi A. et al. (2021) Structure features of surface layers in structural steel after laser-plasma alloying with 48(WC-W2C)+48Cr+4Al powder. *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 01–04. <https://doi.org/10.1109/NAP51885.2021.9568516>

FEATURES OF THE STRUCTURE OF COATINGS OF TUNGSTEN AND CHROMIUM CARBIDES DURING DETONATION-GAS SPRAYING WITH ENERGY ACCUMULATION IN A MULTI-CHAMBER DEVICE

Ke Liming, P.D. Stukhliak, V. M. Mudrichenko

Scientific-Research Institute of Welding Technologies named after E.O.Paton in Zhenjiang Province. 233 Yonghui Road, Xiaoshan District, Hangzhou City, Zhejiang Province, China. E-mail: stukhlyakpetro@gmail.com

This paper presents the results of studies of the structure of coatings obtained from powders based on chromium (75Cr₃C₂ + 25NiCr) (wt. %) and tungsten carbides (WC+12Co) (wt. %) by detonation-gas spraying with energy accumulation in multi-chamber devices. It has been established that this technology provides high-density coatings with a thickness of 200...500 μm with a porosity of less than 1 % and microhardness HV0.5 = 1235 ± 80 (WC + 12Co) (wt. %) and 1547 ± 150 (75Cr₃C₂ + 25NiCr) (wt. %). A characteristic feature of these coatings is the formation of a substructure of the size of 1...8 microns and of carbide-type hardening phases with dimensions of 100...800 nm, which are evenly distributed in the volume of the coating material. It was established that a high level of structural strengthening of these coatings is provided by formation of a material with a dispersed subgranular structure with a uniform distribution of particles of strengthening phases in it. 27 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: protective coatings, multi-chamber shot blasting, microstructure, microhardness, substructure, structural hardening

Отримано 21.06.2024

Отримано у переглянутому вигляді 27.08.2024

Прийнято 08.10.2024