

О.О. Гончарук, Л.Ф. Головки, О.Д. Кагльак, С.М. Волошко, А.П. Бурмак

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНЕ ЛАЗЕРНЕ СПІКАННЯ АЛМАЗОВІСНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Розроблено новий метод термодформаційного лазерного спікання алмазовмісних композитів для абразивного інструменту. Застосовано Ni-Co зв'язку та синтетичні алмази АС125. Встановлено режими лазерної обробки (500–1000 Вт, 0,18–0,36 с), що забезпечують синтез щільного бездефектного шару на сталевій підкладці. Досліджено морфологію межі алмаз/зв'язка та формування карбіду Cr₇C₃, що покращує змочуваність алмазів і зчеплення з матрицею.

Ключові слова: лазер, спікання, алмаз, зв'язка, порошки, композит, структура, фазовий склад

O.O. Honcharuk, L.F. Holovko, O.D. Kahliak, S.M. Voloshko, A.P. Burmak

THERMO-DEFORMATION LASER SINTERING OF DIAMOND-CONTAINING COMPOSITES FOR ABRASIVE MACHINING OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS

The main drawback of existing technologies for producing diamond-containing abrasive tools is their low efficiency and the limited number of suitable binder materials for the working layer with filler. This is due to the maximum allowable heating temperatures of diamonds (up to 700–800 °C). The prolonged sintering process, unpredictable tool durability, increased diamond consumption, and high processing cost necessitate the development of new synthesis methods for composites with superhard materials (SHM).

Therefore, this study explores a fundamentally new process of laser synthesis of diamond-containing composite materials for the production of abrasive tools. These tools can be used for grinding large-size sheet products made of carbon fiber, fiberglass, organoplastics, honeycomb panels, and other materials widely used in machine building.

Synthetic diamonds ASI25 (grain size 425/300) were used as abrasive grains, while the binder consisted of Ni-based powders (fraction 50 μm) with the addition of Co. Technological equipment equipped with a Maxphotonics 4th-generation fiber laser emitter (λ = 1.06 μm) was employed, along with a set of experimental methods of physical materials science.

As a result of thermo-deformation laser sintering in an inert atmosphere (source power 500–1000 W, exposure time 0.18–0.36 s), a dense, defect-free diamond-containing layer was synthesized on the surface of a steel substrate.

The addition of Co to the Ni-based binder enabled the formation of an extensive contact area with the diamonds and allowed for the analysis of the interfacial morphology between diamond and binder, depending on the irradiation conditions. The optimal laser processing parameters were determined, which ensure the formation of Cr₇C₃ carbide and improved wettability of the diamonds by the binder material.

Keywords: laser, sintering, diamond, binder, powders, composite, structure, phase composition

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток сучасних інтегрованих технологій та тенденція до створення високопродуктивного технологічного обладнання визначають суттєве зростання вимог до техніко-економічних показників абразивних інструментів, оснащених НТМ і, перед усім, до підвищення ресурсу їх роботи та надійності [1].

Основною проблемою є забезпечення міцного закріплення абразивних зерен на робочій поверхні, надання їм ріжучої здатності, яка повинна зберігатися в процесі роботи. До теперішнього часу відомі різні способи закріплення – спікання порошкових матеріалів, заливка розплавленим металом, гальванічне осадження, плазмове напилювання тощо [2, 3]. Доцільність використання лазерного випромінювання для спікання порошкових композиційних матеріалів обговорюється і у багатьох роботах [4–6].

Тим не менш процеси виготовлення абразивного робочого шару та механізми формування сполучного інтерфейсу між металевими сплавами та абразивними зернами все ще потребують подальших ґрунтовних досліджень [7].

Основними проблемами залишаються велика неоднорідність структури інструментального абразивного шару і пов'язані з цим залишкові деформації корпусу інструменту, низька жорсткість у осьовому напрямку, недостатня його зносостійкість, яка зменшується по мірі зменшення товщини інструментального абразивного шару, низька продуктивність процесу спікання [8].

На сьогодні увага приділяється лазерному синтезу композитів Cu/алмаз [9], Ni/Cu/алмаз [10], Al/алмаз [11, 12], Ti/алмаз [13, 14], Ni-Cr [15].

Постановка проблеми дослідження. Добре зрозуміло, що наявність армуючих добавок змінює фізичні властивості металевих матеріалів і, отже, впливає на термічні та реологічні характеристики басейну розплаву. Як наслідок, матеріали з НТМ матимуть іншу технологічність порівняно з монолітними матеріалами, і це факт, який потребує подальших поглиблених

досліджень. Таким чином, відчувається необхідність повного розуміння проблем та перспектив процесів лазерного спікання для виробництва таких матеріалів [16].

Тому метою даної роботи є дослідження впливу різних режимів лазерного синтезу алмазовмісних композитів із матеріалом зв'язки на основі системи Ni-Cr-Co на їх структуру, фазовий та хімічний склад, а також аналіз факторів, які впливають на міцність утримання абразивних зерен зв'язкою.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження процесу лазерного термомодеформаційного спікання проведено за допомогою технологічного обладнання, оснащеного оптоволоконним лазерним випромінювачем Maxphotonics 4-го покоління.

Синтезований алмазовмісний композит у міру переміщення на відстань 16 – 20 мм від центру зони дії лазерного променя ущільнюється роликком.

У якості абразивних зерен використані синтетичні алмази марки AC125 зернистістю 425/300 (показник статичної міцності зерен 166 Н). У якості зв'язки використовувались порошки на основі нікелю ПГ-12Н-01 (табл. 1) до яких додавався кобальт (90 % від загальної маси порошкової суміші). Порошки мали сферичну форму і розмір 50 мкм.

Зв'язка та зерна синтетичних алмазів (концентрація яких складала 20% від маси зв'язки) механічно змішувались упродовж 3-х годин та наносились на поверхню металевої пластини зі сталі 40Л, розміром 7,6x50x100 мм шаром 5x2,4 мм. Для фіксації зв'язки на поверхні пластини, остання зволожувалась цапонлаком.

Табл. 1.

Хімічний склад зв'язки ПГ-12Н-01

Елемент	Cr	B	Si	Fe	C	Ni
Вміст, ваг.%	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	основа

Технологічні параметри лазерної обробки варіювалися в діапазоні: довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм, потужність $P=500-1000$ Вт, густина потужності $w=1,77-3,54 \cdot 10^3$ Вт/см², час обробки $\tau=0,18-0,36$ с, швидкість переміщення композиту в процесі лазерного спікання алмазовмісного шару 0,5–1 м/хв, діаметр плями $d=3$ мм, площа плями $S=0,283$ см², фокусна відстань $F=330$ мм (табл. 2). Лазерне спікання алмазовмісних композитів здійснювалося в нейтральному середовищі для запобігання окисненню (кут подачі 45°), витрати аргону складала 20 л/хв. Вибір режимів ґрунтувався на результатах [17].

Табл. 2

Режими лазерного спікання алмазовмісних композитів

№ зразка	v , м/хв	τ , с	P , Вт	$w \cdot 10^3$, Вт/см ²
1	1,00	0,18	1000	3,54
2	0,60	0,30	1000	3,54
3	0,50	0,36	500	1,77

Поверхнева морфологія зразків та хімічний склад досліджувалися з використанням скануючого електронного мікроскопа TESCAN VEGA3 з енергодисперсійним аналізатором.

Рентгеноструктурні дослідження здійснювалися з використанням дифрактометра Rigaku Ultima IV (випромінювання $\lambda_{K\alpha-Cu}$): інтервал кутів $2\Theta = 20^\circ-120^\circ$, крок реєстрації – $0,04^\circ$, час витримки в точці – 2 с, напруга – 40 кВ, сила струму – 40 мА. Для аналізу отриманих рентгенівських спектрів, розрахунку розміру областей когерентного розсіювання (ОКР), ступеню деформації кристалічної ґратки (ϵ) використовувалося програмне забезпечення PDXL, міжнародна база даних дифракції ICDD (PDF-2 (2025)). Кількісний фазовий аналіз виконувався методом RIR (Reference Intensity Ratio), який полягає у порівнянні відношення інтенсивності найбільш сильних рефлексів фази і корунду в їхній суміші з масовими частками.

У процесі лазерного спікання алмазовмісних композитів із застосуванням широко розповсюджених зв'язок на основі Ni, як правило, практично не можливо забезпечити щільний тепловий контакт на межах алмаз/зв'язка оскільки алмази погано змочуються розплавом зв'язки. Для вирішення цієї проблеми до складу зв'язки ПГ-12Н-01 додавався Со. Як відомо, з метою збільшення міцності утримання зерен алмазів на поверхні інструменту доцільно застосовувати металеві зв'язки, температури плавлення яких перевищують температуру початку графітизації алмазів, тобто > 700 °С. Зв'язка на основі системи Ni-Cr-Co задовільняє цій умові (температура плавлення Со – 1494 °С, Ni – 1455°С, Cr – 1907°С). Структуру та хімічний склад використаної зв'язки ПГ-12Н-01 + Со наведено на рис. 1. Формується евтектична структура, вміст Со складає 41

мас.%, Ni – 39 мас.%, Cr – 4 мас.%. Структура евтектики Ni-Cr-Co складається з твердих розчинів Ni-Cr з ОЦК-граткою та Ni-Co з ГЦК-граткою. У результаті утворюються сильно розгалужені дендрити евтектичних фаз, що взаємно пророщуються в процесі евтектичної кристалізації.

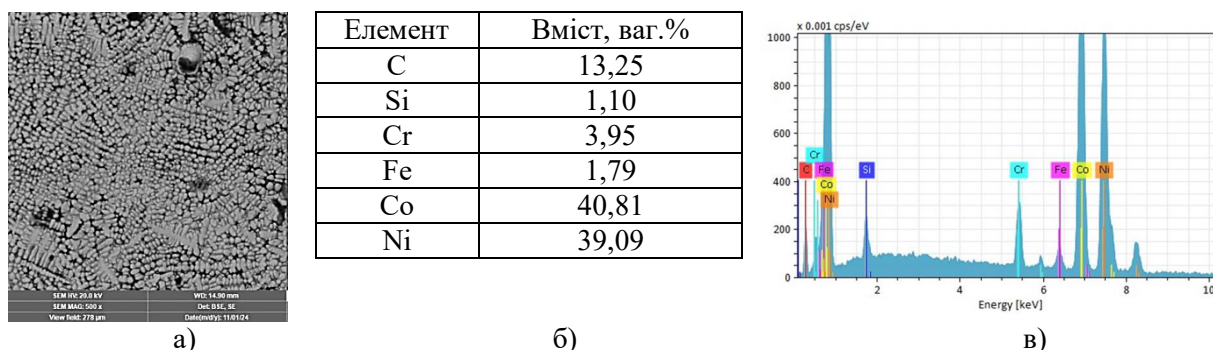


Рис. 1. Структура (а) та хімічний склад (б, в) зв'язки ПГ-12Н-01 + Со

На рис. 2 представлено зображення поверхні отриманих композитів, які містять зерна алмазів, занурених до матеріалу зв'язки. Глибина занурення алмазного зерна відповідає необхідним вимогам (не менше 1/3 від їх розміру). Зразки 1 та 2 розрізняються часом впливу лазерного опромінення, а зразок 3 отриманий за вдвічі меншої потужності і максимального часу опромінення. Варювалась і швидкість переміщення композиту в процесі лазерного спікання, яка вдвічі зменшувалась від зразка 1 до зразка 3.

Для усіх зразків спостерігається щільне охоплення алмазів матеріалом зв'язки без тріщин, пор та інших дефектів. Завдяки додаванню кобальту спостерігається цілком задовільна змочуваність поверхонь алмазів матеріалом зв'язки Ni-Cr-Co. Для зразка 1 характерне найбільш інтенсивне проплавлення порошків із охопленням окремих алмазних зерен матеріалом зв'язки.

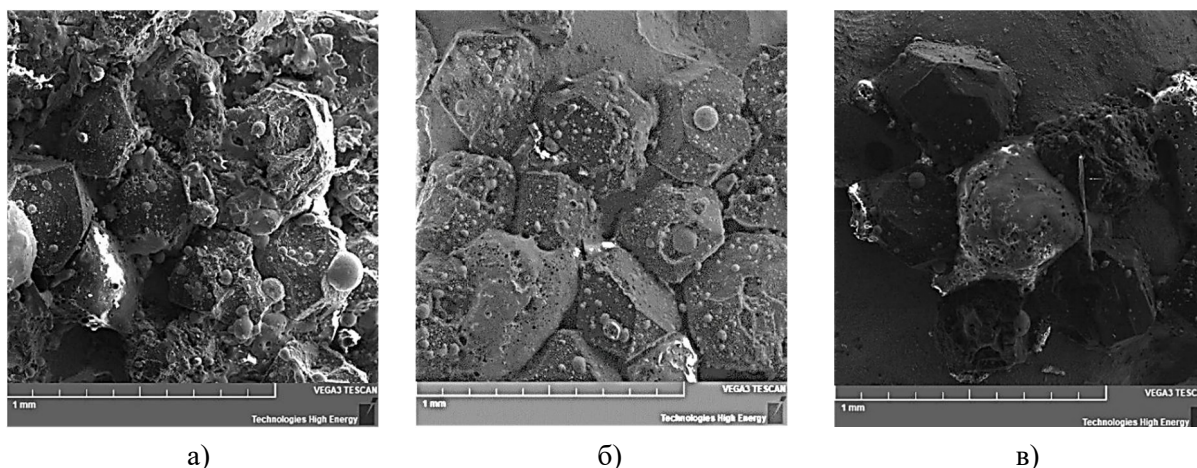


Рис. 2. Морфологія алмазних зерен після лазерного спікання композиту за різних режимів: а) – зразок 1, б) – зразок 2, в) – зразок 3 (табл. 2)

На рис. 3, а наведено зображення окремого алмазного зерна для 1-го зразка із застиглими бризками розплаву. Аналіз карт розподілу хімічних елементів (рис 3, в) свідчить, що під час синтезу відбувається проплавлення підкладки і залізо локально фіксується на поверхні алмазу (позначене жовтим кольором). Спостерігається чітка межа розділу між алмазом та зв'язкою (рис. 3, б), що свідчить про термічну стабільність алмазного зерна. Ця межа має хвилясту морфологію (рис. 3, д, е). Звертає на себе увагу, що в області, яка оточує алмаз, наявний вуглець (рис. 3, з). Це свідчить про можливе формування карбідів та утворення графіту.

Для порівняння на рис. 4 наведено аналогічні результати для зразка 3. На поверхнях алмазу, які виступають над зв'язкою, покриття відсутнє (рис. 4, а), і ріжучі крайки практично відкриті (рис. 4, б). У цьому випадку межа розділу між алмазом та зв'язкою є різкою і має практично лінійний характер. В околі зерна наявності вуглецю майже не спостерігається (рис. 4, в).

Оскільки концентрація Cr є невеликою, зробити однозначний висновок щодо його розподілу на межі алмаз/зв'язка не представляється можливим за даними енергодисперсійного аналізу. Зважаючи на те, що ентальпія утворення карбиду хрому Cr_7C_3 складає $-189,5$ кДж/моль порівняно, наприклад, із карбідом нікелю Ni_3C ($-75,31$ кДж/моль), то, цілком ймовірно є формування саме

карбіду хрому. Цей карбід утворюється найчастіше в конструкційних сталях з відносно невисоким вмістом хрому (до 3–4%).

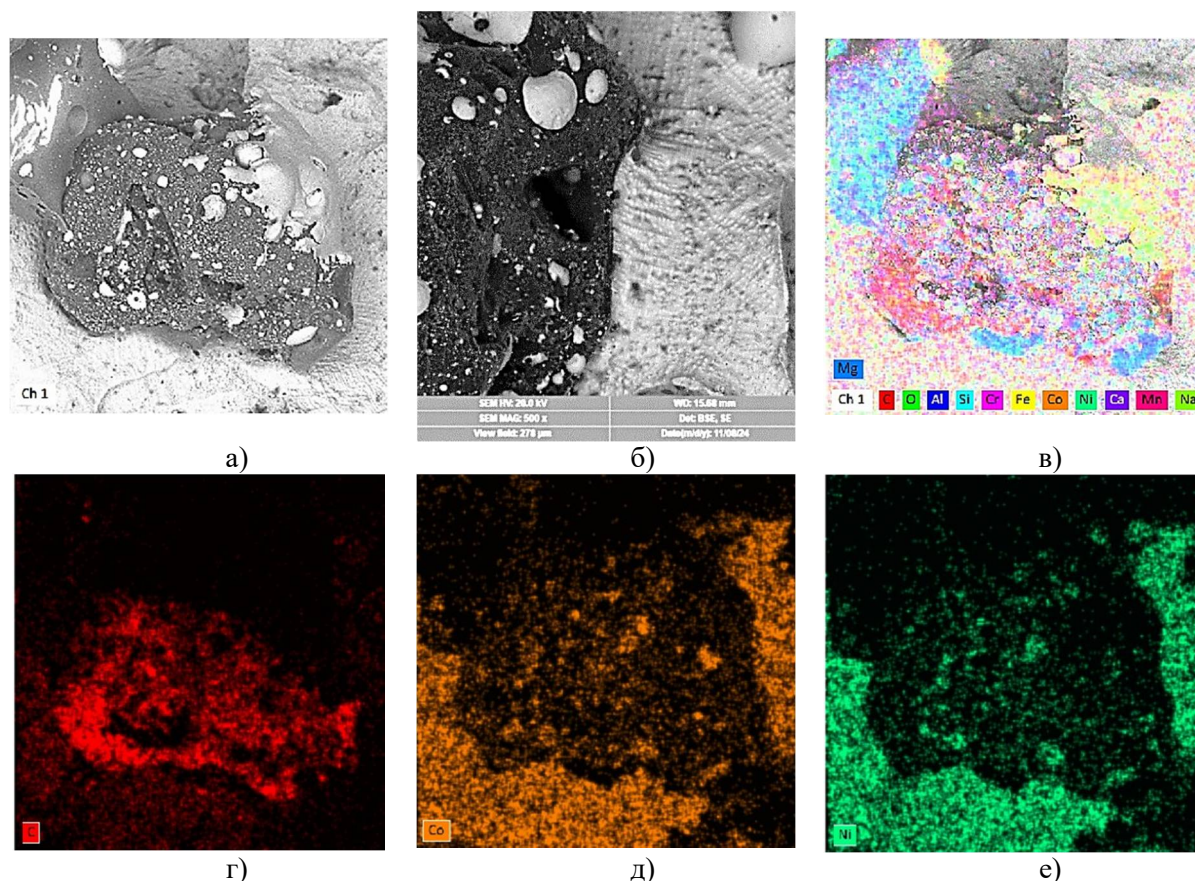


Рис. 3. Морфологія поверхні синтезованого абразивного композиту з алмазом і зв'язкою та карти розподілу хімічного складу (зразок 1)

Для визначення можливості утворення карбідів у зв'язці під час лазерного синтезу проведено фазовий аналіз, результати якого представлено на рис. 5 та в табл. 3. Виявлені дифракційні максимуми від твердих розчинів на основі кобальту (ОЦК), нікелю та хрому (ГЦК), алмазу, графіту та карбіду хрому Cr_7C_3 . Таким чином під час лазерного спікання відбувається дифузійна взаємодія атомів вуглецю з хромом на поверхнях алмазу, що контактують із матеріалом зв'язки, з формуванням карбіду Cr_7C_3 . Згідно [15] механізм зчеплення на межі алмаз/зв'язка інтерпретується так: завдяки хімічній реакції утворюються стовпчасті та голчасті структури карбіду, які забезпечують високоміцний металургійний зв'язок між шаром зв'язки та алмазом.

Результати визначення кількісного фазового складу свідчать, що вміст карбіду хрому Cr_7C_3 у сформованих алмазовмісних композитах є найбільшим (16 ваг.%) для зразка 1 і дещо меншим для зразка 3 (10 ваг.%), що добре узгоджується з результатами хімічного аналізу. Для зразка 2 формування цього карбіду зафіксувати не вдалося, тому вміст алмазів відповідно є найбільшим – 41 ваг.%. Кількість графіту є незначною для всіх зразків і коливається від 2 до 6 ваг.%, тобто деструкції алмазних зерен з виділенням графіту не відбувається.

Розмір ОКР алмазу є найбільшим для зразка 3 і зменшується до 43 нм та 15 нм для зразків 2 і 1, відповідно. Найбільша деформація кристалічної ґратки алмазу на рівні 2% навпаки спостерігається для зразка 1 і зменшується до 0,6% та 0,5% відповідно для зразків 2 та 3. Це також свідчить, що найбільш інтенсивного лазерного впливу зазнає зразок 1. Усадка зв'язки внаслідок плавлення і кристалізації (для сплаву Ni-Cr-Co $\sim 10 \times 10^{-6}/^\circ C$) і лінійне розширення алмазу ($\sim 1 \times 10^{-6}/^\circ C$) відрізняються на порядок величини. Тому між зв'язкою і зерном алмазу виникають розтягуючі напруження, однак за обраних умов лазерного термомодеформаційного спікання вдається забезпечити щільне охоплення алмазу матеріалом зв'язки за рахунок утворення проміжного шару карбіду хрому, що покращує змочуваність алмазу матеріалом зв'язки і дозволяє запобігти утворенню тріщин та інших дефектів.

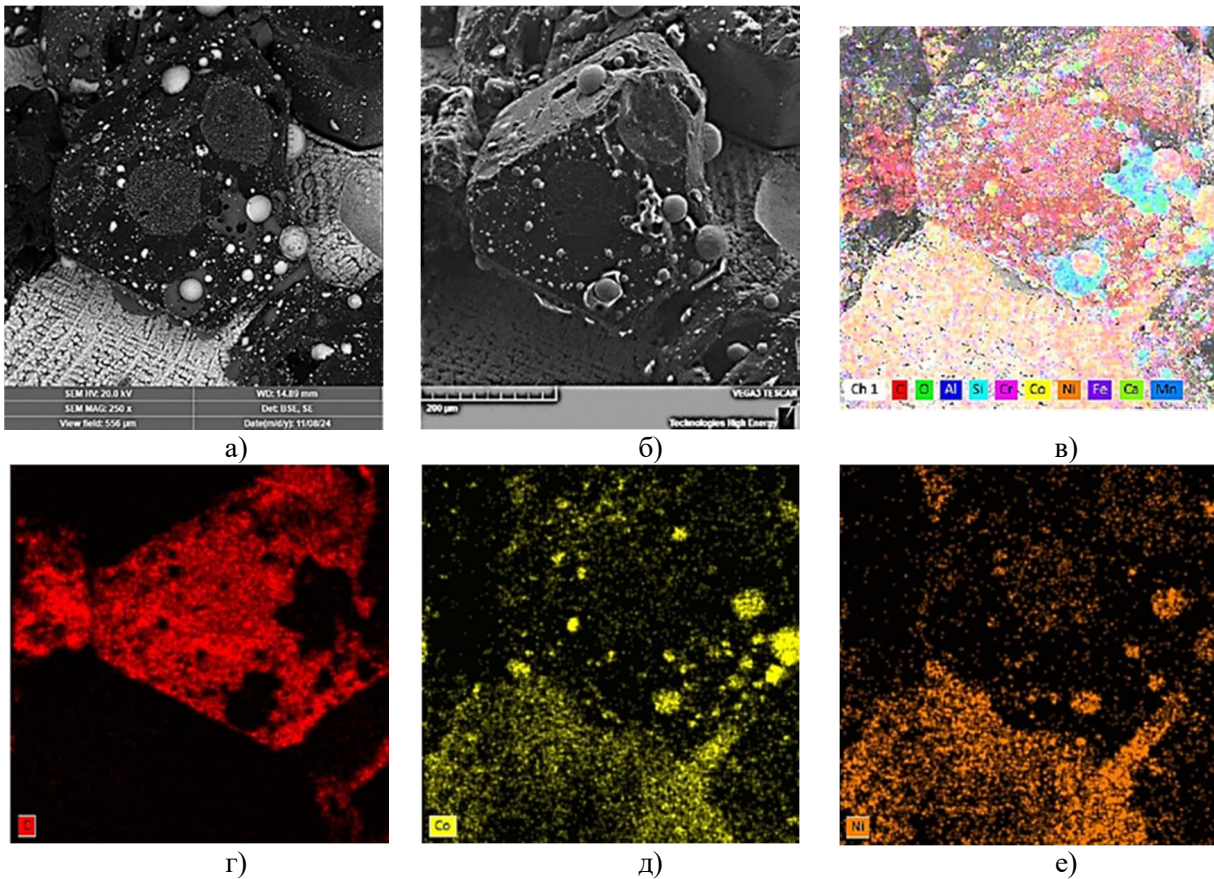


Рис. 4. Морфологія поверхні синтезованого абразивного композиту з алмазом і зв'язкою та карти розподілу хімічного складу (зразок 3)

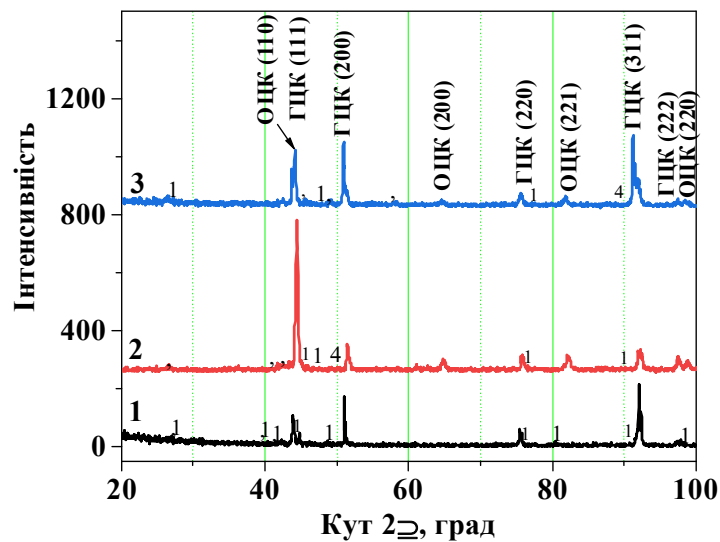


Рис. 5. Фазовий склад синтезованих композитів (Δ – алмаз; \bullet – карбід Cr_7C_3)

Карбід Cr має достатньо велику міцність адгезії до алмазу і при цьому високу теплопровідність. Деформація кристалічної ґратки цього карбиду є меншою для зразка 3 (0,5%) порівняно із зразком 1 (2,24%), так само як і кристалічної ґратки алмазу.

Табл. 3

Результати рентгеноструктурного аналізу

Режим обробки	Фазова складова	Просторова група	a, b , нм	c , нм	ОКР, нм	ϵ , %	Вміст, ваг.%
1	ОЦК	229:Im-3m	0,2915	0,2915	91	0,3	27
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3240	0,3240	74	0,11	41
	Графіт	194:P63/mmc	0,2300	0,676	224	3,4	2

	Алмаз	227:Fd-3m	0,3553	0,3553	15	2,05	14
	Карбід хрому	186:P63mc	1,423	0,4030	20	2,24	16
2	ОЦК	229:Im-3m	0,2876	0,2877	202	0,1	32
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3552	0,3552	339	0,17	23
	Графіт	194:P63/mmc	0,1930	0,6732	76	0,58	4
3	Алмаз	227:Fd-3m	0,3504	0,3504	43	0,62	41
	ОЦК	229:Im-3m	0,2654	0,2654	28	1,27	34
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3715	0,3715	138	0,02	19
	Графіт	194:P63/mmc	0,262	0,6732	154	0,41	6
	Алмаз	227:Fd-3m	0,3558	0,3558	212	0,37	31
	Карбід хрому	186:P63mc	1,404	0,412	58	0,48	10

Висновки

1. Термодетформаційним спіканням з використанням оптоволоконного лазера ($\lambda=1,06$ мкм) потужністю 500–1000 Вт упродовж 0,18–0,36 с на поверхні сталевій підкладки синтезований щільний бездефектний алмазовмісний шар.

2. Додавання Со (90 % від загальної маси порошкової суміші) до зв'язки ПГ-12Н-01 на основі Ні дозволило сформувати щільну розвинену площу контакту з алмазами, морфологія межі розділу алмаз/зв'язка визначається режимами опромінення і змінюється від хвилястої до лінійної.

3. Формування карбіду хрому відбувається для двох режимів обробки – $P=1000$ Вт, $\tau=0,18$ с та $P=500$ Вт, $\tau=0,36$ с. Збільшення тривалості лазерного впливу за енергії 1000 Вт з одночасним зменшенням швидкості подачі порошку перешкоджає процесу карбідоутворенню. Однак, якщо при цьому зменшити енергію лазерного променя вдвічі, то можна сформувати карбід Сг з мінімальною деформацією кристалічної ґратки як цього карбіду, так і алмазного зерна завдяки тому, що коефіцієнт лінійного розширення карбіду Cr_7C_3 має проміжне значення між алмазом та матеріалом зв'язки.

4. Процес карбідоутворення супроводжується зниженням міжфазного натягу між алмазом і зв'язкою, що покращує змочуваність алмазу матеріалом зв'язки.

Подяка

Дослідження фінансується Національним фондом досліджень України, проект «Синтез алмазовмісних композитів термодетформаційним лазерним спіканням для абразивної обробки великогабаритних деталей авіа-, судно- та машинобудування» (№ 0124U003940).

Література

1. Singh V. K., Singh N. K., Singh Y. Composites: Modeling and Manufacturing. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 208 с.
2. Vasiliev V., Luchaninov O., Reshetniak O., Strel'nitskij V., Nasioka Iu., Danylenko I., Sabov T., Lementarov V., Horobei O. Tuning of adhesion and hardness of diamond-like carbon vacuum arc coatings by changing the amplitude of pulsed bias potential applied to the substrate // Thin Solid Films. – 2023. – Vol. 783. – Art. 140061.
3. Лавріненко В. І. Сучасні напрацювання в процесах алмазної обробки та особливостях модифікування поверхні алмазних зерен для спрямованої зміни їхніх властивостей (Огляд) // Надтверді матеріали. – 2024. – № 6. – С. 60–83.
4. Zhang J., Wang J., Zhang G., Huo Z., Huang Z., Wu L. A review of diamond synthesis, modification technology, and cutting tool application in ultra-precision machining // Materials & Design. – 2024. – Vol. 237. – Art. 112577.
5. Silva M., Santos N., Pinto M., Guieu S., Oliveira R., Figueira F., Paz F. A. A., Neto M., Rino L., Deuermeier J., Maradiya M., Lieh M., Mendes J. C., Braga S. S. Photochemical modification of a diamond surface using a pulsed UV laser as the energy source // Diamond & Related Materials. – 2024. – Vol. 147. – Art. 111314.
6. Peng Y., Jin T., Yang B., Shi Y., Gao Y., Zhang W. Thermal-mechanical evolution behaviors of metal matrix diamond composite by powder bed fusion-laser beam // Journal of Materials Research and Technology. – 2024.

7. Ding W., Zhao B., Zhang Q., Fu Y. Fabrication and wear characteristics of open-porous cBN abrasive wheels in grinding of Ti-6Al-4V alloys // *Wear*. – 2021. – Vol. 477. – Art. 203786.
8. Long F., He P., Sekulic D. P. Research and Development of Powder Brazing Filler Metals for Diamond Tools: A Review // *Metals*. – 2018. – Vol. 8, No. 5. – Art. 315.
9. Constantin L., Fan L., Pontoreau M., Wang F., Cui B., Battaglia J.-L., Silvain J.-F., Lu Y. F. Additive manufacturing of copper/diamond composites for thermal management applications // *Manufacturing Letters*. – 2020. – Vol. 24. – P. 61–66.
10. Wu Z., Mao A., Wadle L., Huang X., Kraiem N., Silvain J.-F., Cui B., Lu Y. Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol. 149. – Art. 111549.
11. Kraiem N. Laser 3D Printing of Diamond-Based Composite Materials for Thermal Management Applications: dissertation. – University of Nebraska-Lincoln, 2024. – (Dissertations and Doctoral Documents, 2023–157).
12. Ma Y., Ji G., Li X. P., Chen C. Y., Tan Z. Q., Addad A., Li Z. Q., Sercombe T. B., Kruth J. P. On the study of tailorable interface structure in a diamond/Al12Si composite processed by selective laser melting // *Materialia*. – 2019. – Vol. 5. – Art. 100242.
13. Fox K., Mani N., Rifai A., Reineck P., Jones A., Tran P. A., Ramezannejad A., Brandt M., Gibson B. C., Greentree A. D., Tran N. 3D-Print Diamond–Titanium Composite: Hybrid Material for Implant Engineering // *ACS Appl. Bio Mater.* – 2020. – Vol. 3. – P. 29–36.
14. Rifai A., Tran N., Reineck P., Elbourne A., Mayes E., Sarker A., Dekiwadia C., Ivanova E. P., Crawford R. J., Ohshima T., Gibson B. C., Greentree A. D., Pirogova E., Fox K. Engineering the Interface: Nanodiamond Coating on 3D-Printed Titanium Promotes Mammalian Cell Growth and Inhibits *Staphylococcus aureus* Colonization // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2019. – Vol. 11.
15. Long F., He P., Sekulic D. P. Research and Development of Powder Brazing Filler Metals for Diamond Tools: A Review // *Metals*. – 2018. – Vol. 8, No. 5. – Art. 315.
16. Dadkhah M., Mosallanejad M. H., Iuliano L. et al. A Comprehensive Overview on the Latest Progress in the Additive Manufacturing of Metal Matrix Composites: Potential, Challenges, and Feasible Solutions // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. – 2021. – Vol. 34. – P. 1173–1200.
17. Гончарук О. О., Головка Л. Ф., Волошко С. М., Кагляк О. Д., Бурмак А. П., Ключніков Ю. В. Математичне моделювання лазерного синтезу робочого шару абразивного інструмента // *Технологія і техніка друкарства*. – 2024. – № 3(85). – С. 51–68.