

УДК 621.921.343

**Д. А. Стратійчук^{1,*}, Н. М. Білявина², В. З. Туркевич¹,
С. П. Старик¹, Я. М. Романенко¹**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля,
НАН України, м. Київ, Україна

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
м. Київ, Україна

*d_strat@ukr.net

До питання рідкофазної взаємодії між cBN та високоентропійними сплавами

За умов високих тисків та температур розглянуто взаємодію між мікропорошком cBN та високоентропійним сплавом (BEC), зокрема 37Ni19Fe19Cr17Co4Ti4Al % (за об'ємом). Показано, що під час HPHT спікання за температури $T_{\text{сп}} = 2250$ °C і часу 60 с у системі 70cBN–30BEC % (за об'ємом) рідка фаза сплаву заповнює увесь міжзерений простір зі створенням металокерамічного композита. Методами рентгенофазового аналізу та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії в структурі композита не виявлено продуктів взаємодії вихідних компонентів або твердих розчинів на їхній основі.

Ключові слова: високий тиск, cBN-кераміка, рентгенофазовий аналіз, енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія, рідкофазне спікання, високоентропійний сплав.

Під час отримання надтвердих полікристалічних композитів на базі cBN як активаторів спікання доволі часто використовують мікропорошки перехідних металів, зокрема Co, Ni, Ti, Zr, які одночасно із легкоплавким Al сприяють формуванню безпористого матеріалу [1]. За даними у [2] металевий Co за температури спікання 1500 °C і тиску 5,5 ГПа частково взаємодіє із cBN з утворенням фази CoB₂, водночас реакційне рідкофазне спікання 70 % (за масою) cBN із Ti та Al дозволяє сформувати надтверду кераміку із показниками міцності на згин вище 800 МПа, що є дуже високим значенням. Але залишається відкритим питання низької хімічної спорідненості Co&Ni-вмісних сплавів стосовно cBN і, як наслідок, утворення інструментальної кераміки, яка містить у своїй структурі осередки металевої фази [3]. Переважно різні автори наголошують на позитивному впливі металевих включень мікронних розмірів у структурі cBN-композитів, оскільки це підвищує загальну в'язкість руйнування матеріалу. Раніше у [4] було досліджено

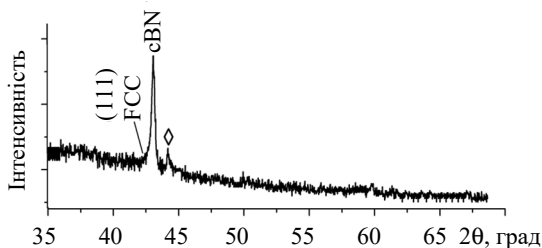
вплив високоентропійних сплавів (BEC) у кількості 5 % (за об'ємом) на формування надтвердої кераміки в системі cBN–TiC/ZrN–BEC, однак через малу концентрацію BEC не вдалося визначити характер можливої хімічної взаємодії.

У роботі представлено результати НРНТ спікання в системі cBN–BEC за умови наявності рідкої фази, досліджено зміну морфології зерен cBN та характер наявних хімічних перетворень.

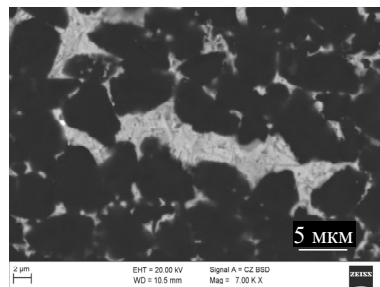
Як стартову суміш для спікання використовували однорідну шихту складу cBN–BEC (70:30 % (за об'ємом)). Мікропорошок кубічного нітриду бору марки Grade6 (виробництва “Element Six”) мав розмір частинок від 4 до 10 мкм. Механоактивований у планетарному млині мікропорошок BEC складу 37Ni19Fe19Cr17Co4Ti4Al % (за масою) або у мольному співвідношенні $\text{Ni}_{0,638}\text{Fe}_{0,345}\text{Cr}_{0,365}\text{Co}_{0,283}\text{Ti}_{0,083}\text{Al}_{0,148}$ мав фракцію –20 мкм із середнім розміром частинок 5–7 мкм. Вибір об'ємного співвідношення компонентів 70/30 продиктований необхідністю збільшити площу контактів між зернами cBN та розплавом BEC.

Спікання однорідної дегазованої у вакуумі шихти проведено в апараті високого тиску типу “тороїд-30” в графітових нагрівниках за температури 2250 °C та тиску 7,7 ГПа протягом 1 хв. Для запобігання контакту BEC із нагрівником та блокування алмазоутворення використано захисну капсулу з AlN кераміки. Слід зазначити, що $T_{\text{пл}}$ вибраного BEC за атмосферного тиску становить 1323 °C, а використання високого тиску зазвичай підвищує температуру плавлення нікелевих сплавів на 30–50 К/ГПа, однак навіть за таких умов спікання система cBN–BEC залишається рідкофазною.

За допомогою даних скандувальної електронної мікроскопії (СЕМ), отриманими у матеріальному контрасті з використанням фазочутливого детектора Compact Zeiss BSD для збирання зворотно розсіяних електронів із шліф-поверхні зразка, показано, що зерна cBN знаходяться в оточенні закристалізованого високоентропійного сплаву і створюють металокерамічну матрицю без явних ознак хімічної взаємодії (рисунк, б). Зокрема, для основної частини зерен зберігається гостро кутова морфологія, яка характерна для вихідного мікропорошку, візуально не спостерігали утворення вторинних фаз. Додатково проведений локальний елементний аналіз за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії по міжфазним границям також не виявив інших новоутворень, окрім зерен cBN та $\text{Ni}_{0,638}\text{Fe}_{0,345}\text{Cr}_{0,365}\text{Co}_{0,283}\text{Ti}_{0,083}\text{Al}_{0,148}$, що збігається з даними рентгенофазового (РФ) аналізу (див. рисунок, а).



а



б

Результати РФ-аналізу композита cBN–BEC, отриманого за температури $T_{\text{сп}} = 2250$ °C, де $\diamond$ – α -Fe (а), та СЕМ зображення його шліф-поверхні (б).

ВИСНОВКИ

За вибраних режимів спікання хімічна взаємодія між кубічним нітридом бору та високоентропійним Ni-вмісним сплавом відсутня або носить дуже обмежений приповерхневий характер.

Вивчення кристалографічних характеристик складових компонентів отриманої металокераміки не підтвердило формування твердих розчинів.

ФІНАНСУВАННЯ

Роботу виконано за фінансової підтримки Національної академії наук України за договором № 5.9/26-П(2) від 01.01.2026 р. на виконання наукового проєкту “Розроблення надтвердих композиційних матеріалів на основі кубічного нітриду бору з активуючими добавками високоентропійних сплавів для використання при обробці жароміцних сплавів та суперсплавів на основі нікелю” та за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (тема № 24БФ051-01 “Синтез біосумісних металокерамічних композитів для підвищення зносостійкості медичних інструментів та імплантів на основі титану”).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

D. A. Stratiichuk¹, N. M. Belyavina², V. Z. Turkevich¹, S. P. Starik¹,
Ya. M. Romanenko¹

¹Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

On the issue of liquid phase interaction between cBN
and high-entropy alloys

Under conditions of high pressure and temperature, the interaction between cBN micropowder and high-entropy alloys, in particular Ni₃₇Fe₁₉Cr₁₉Co₁₇Ti₄Al₄, was investigated. It was demonstrated that during HPHT experiments at T_S – 2250 °C and a dwell time of 60 sec in the cBN (70%)-HEA (30% vol.) system, the alloy melt fills the entire intergranular space, forming a metal-ceramic composite. Using XRD and EDS analysis, no products of interaction between the initial components or solid solutions based on them were found in the composite structure.

Keywords: high pressures, cBN ceramics, XRD and EDS analysis, liquid-phase sintering, high-entropy alloys.

1. Mo P.C., Chen J.R., Chen C., Qin H.Q., Xiao L.Y. Effect of Zr/Al binder ratio on properties of PCBN composites. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2023. Vol. 113, art. 106205.
2. Mo P., Chen J., Chen Ch., Qin H., Lin F. Fabrication of polycrystalline cubic boron nitride composites under high pressure. *Process. Appl. Ceram.* 2023. Vol. 17, is. 2. P.157–163.
3. Ji H., Li Z., Sun K. Assessment of the performance of TiB₂ nanoparticles doped cBN–TiN–Al–Co composites by high temperature high pressure sintering. *Mater. Chem. Phys.* 2019. Vol. 233. P. 46–51.
4. Стратійчук Д.А., Туркевич В.З., Осіпов О.С., Старик С.П., Мельничук Ю.О., Романенко Я.М. Вплив високоентропійного сплаву Ni_{0,65}Cr_{0,35}Co_{0,27}Fe_{0,33}Ti_{0,1}Al_{0,07} на процеси спікання cBN-композитів інструментального призначення. *Інструментальне матеріалознавство: зб. наук. пр.* Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2025. Вип. 28. С. 207–217.

Надійшла до редакції 05.01.26

Після доопрацювання 09.01.26

Прийнята до опублікування 14.01.26