

Надтверді композиційні матеріали на основі кубічного нітриду бору з активуючими добавками високоентропійних сплавів

Щерецький О. А.¹, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, 07shch@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9030-876X>

Щерецький В. О.^{1, 2}, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, rnmptima@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>

Туркевич В. З.³, академік НАН України, професор, директор, vturk@ism.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1441-4269>

Стратійчук Д. А.³, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, dialab@ism.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4911-5629>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля, НАН України, Київ, Україна

У роботі досліджено можливість використання високоентропійних сплавів (ВЕС) як зв'язуючої фази в надтвердих композиційних матеріалах на основі кубічного нітриду бору (cBN). Розроблено та виплавлено серію сплавів системи Ni–Fe–Cr–Co–Ti–Al із варійованим вмістом алюмінію, що забезпечило формування однофазних, двофазних, евтектичних і багатофазних структур. Актуальність роботи зумовлена необхідністю подолання обмежень традиційних металевих і керамічних зв'язок (недостатня змочуваність, крихкість, високі температури спікання) для створення ефективного різального інструменту. Метою роботи є встановлення впливу фазового складу ВЕС на їхню реакційну здатність щодо cBN та оцінка перспективності застосування таких сплавів як зв'язуючої фази для надтвердих композиційних матеріалів на основі cBN. Виплавлено п'ять сплавів із різним вмістом алюмінію. З методів синхронного термічного аналізу (ДСК/ТГ), ультразвукової спектроскопії та високотемпературного спікання під тиском 7,7 ГПа досліджено теплофізичні властивості сплавів, їхню взаємодію з cBN, а також механічні характеристики надтвердих композиційних матеріалів (твердість за Віккерсом, модуль Юнга, тріщиностійкість). Встановлено, що фазовий склад суттєво впливає на реакційну здатність сплавів до взаємодії з cBN. Показано, що максимальна активність до взаємодії характерна для сплавів, у яких титан знаходиться у твердому розчині, тоді як його зосередження в упорядкованих фазах (типу B2) знижує реакційну здатність. Отримано надтверді cBN-композити методом високотемпературного пресування при тиску 7,7 ГПа та температурі до 2200 °С. Встановлено, що розроблені матеріали характеризуються високими значеннями твердості, модуля Юнга та

тріщиностійкості ($K_{IC} = 8-9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), які не поступаються або перевищують аналогічні показники промислових матеріалів. Показано, що підвищення тріщиностійкості зумовлено реалізацією механізмів відхилення тріщин та мостикового зв'язування за рахунок мікронних включень ВЕС у міжзерновому просторі cBN-матриці.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування високоентропійних сплавів як ефективної зв'язки для створення надтвердих композиційних матеріалів нового покоління.

Ключові слова: *Високоентропійні сплави, cBN-композити, індукційне плавлення, високотемпературне спікання, реакційна взаємодія.*

Надтверді композиційні матеріали на основі кубічного нітриду бору (cBN) є ключовими матеріалами для виготовлення високопродуктивного ріжучого інструменту, призначеного для обробки загартованих сталей, жароміцних сплавів і нікелевих суперсплавів. Висока ефективність таких матеріалів обумовлена їх стабільністю при контакті з залізо- та нікельвмісними сплавами, де алмазні матеріали втрачають працездатність. Водночас досягнення оптимального поєднання твердості, зносостійкості та тріщиностійкості залишається однією з ключових проблем при створенні ефективних cBN-композитів [1]. Традиційні зв'язуючі фази для cBN-композитів включають метали, керамічні та металокерамічні системи, однак кожна з них має суттєві обмеження. Відомо, що ефективність cBN-композитів значною мірою визначається природою зв'язки та її взаємодією з зернами cBN [2]. Металеві зв'язки характеризуються недостатньою змочуваністю cBN, а при наявності змочування – схильністю до утворення крихких реакційних фаз (боридів і нітридів) на міжфазній границі. Крім того, значна різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення між металевою матрицею і cBN призводить до виникнення термічних напружень і мікротріщин при експлуатації. Керамічні зв'язки, навпаки, забезпечують високу термостійкість і хімічну стабільність, однак характеризуються низькою електропровідністю та потребують надвисоких параметрів спікання. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових типів зв'язуючих фаз, здатних поєднати переваги металевих і керамічних систем. Перспективним напрямом є використання високоентропійних сплавів (ВЕС), які характеризуються високою міцністю, пластичністю, термічною стабільністю та зносостійкістю, а також підвищеною стійкістю до дифузійних процесів і окиснення. Завдяки багатокомпонентності та можливості варіювання складу ВЕС можуть забезпечувати керовану міжфазну взаємодію з cBN, що є критично важливим для формування стабільної структури композиту. Разом з тим, незважаючи на зростаючий інтерес до застосування ВЕС у надтвердих композитах, питання взаємозв'язку між фазовим складом високоентропійних сплавів і їх реакційною здатністю до взаємодії з cBN залишається недостатньо вивченим. Зокрема, механізми дифузійної та адгезійної взаємодії на межі cBN – металева зв'язка в умовах високих температур і навантажень досі не мають однозначного пояснення [1]. У зв'язку з цим метою даної роботи є дослідження впливу фазового складу високоентропійних сплавів системи Ni – Fe – Cr – Co – Ti – Al на їх взаємодію з кубічним нітридом бору та

оцінка можливості використання таких сплавів як ефективної зв'язуючої фази в надтвердих cBN-композитах. Для досягнення поставленої мети було розроблено серію сплавів із різним вмістом алюмінію, проведено дослідження їх теплофізичних властивостей і реакційної здатності до взаємодії з cBN, а також отримано і досліджено надтверді композиційні матеріали на їх основі.

Для плавки високоентропійних сплавів (ВЕС) виготовлено експериментальну індукційну установку, що забезпечує проведення плавки в вакуумі та інертній атмосфері з можливістю керованого електромагнітного перемішування розплаву. Використання височастотного генератора зі змінною частотою та імпульсним режимом нагріву дозволило інтенсифікувати перемішування розплаву, зменшити хімічну та макроскопічну неоднорідність литих зразків і мінімізувати негативний вплив кисню. Розроблена установка дозволяє проводити дошихтовку сплаву по ходу плавки та виливання розплаву в металеву форму без розгерметизації, рис. 1.

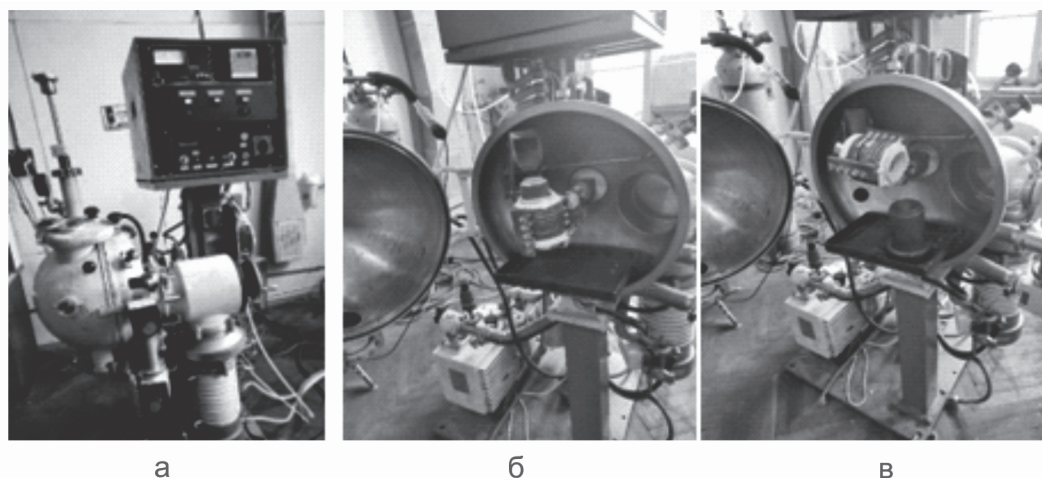


Рис. 1. Вакуумна індукційна піч для виплавки зразків із високоентропійних сплавів: а – загальний вигляд; б – механізм підшихтовки розплаву по ходу плавки; в – механізм розливання розплаву в форму без розгерметизації печі.

Fig. 1. Vacuum induction furnace for melting HEA samples: (a) general view; (b) mechanism for recharging the melt during melting; (c) mechanism for casting the melt into a mold without furnace depressurization.

Для проведення досліджень було виплавлено 5 сплавів з різним вмістом алюмінію та титану, що детермінувало формування різного фазового складу сплавів від однофазної ГЦК-структури, суміші твердих фаз ГЦК+ОЦК до впорядкованої ОЦК-структури типу В2. Для оцінки впливу алюмінію та титану на фазовий стан одержаних ВЕС системи NiFeCrCoTiAl, було розраховано їх термодинамічні та структурні параметри відповідно до принципів, встановлених в роботі [3]. За результатами було обрано склади з термодинамічним фактором $\Omega > 1,1$, різницею атомних радіусів менше 6,6 % (за середньоквадратичним відхиленням по вмісту елементів) та помірно негативними значеннями ΔH_{mix} . При цьому, змінюючи вміст алюмінію і титану в системі, керували показниками концентрації валентних електронів (VEC), а отже, і фазовим складом сплавів. Залежно від значення VEC в

сплавах формувався один із трьох видів структури: $VEC \geq 8$ – формується твердий розчин з ГЦК граткою; $VEC < 6,87$ – формується твердий розчин з ОЦК граткою; при $6,87 \leq VEC < 8$ – формується суміш твердих розчинів з ГЦК + ОЦК гратками (дуплексна структура, що відповідно від умов кристалізації може бути спінодальною, евтектичною або квазіевтектичною), як наведено в таблиці 1.

Таблиця 1
Хімічний склад розроблених сплавів, ат. %, та розрахований показник VEC

Table 1
Chemical composition of the developed alloys (at. %) and calculated VEC parameter

№ сплаву	Ni	Fe	Cr	Co	Ti	Al	Mn	V	VEC
A1	25,79	27,40	26,39	14,10	5,76	0,22	0,29	0,05	7.8
A2	34,89	18,18	19,63	15,44	6,38	5,14	0,13	0,20	7.9
A3	30,42	22,90	17,27	12,10	4,24	12,72	0,16	0,18	7.6
A4	29,16	14,34	17,41	13,16	5,41	20,19	0,12	0,18	7.1
A5	24,93	10,89	15,06	13,53	15,25	20,03	0,11	0,19	6.7

Плавка ВЕС проводили в алундовому тиглі, який розміщений в графітовому стакані. Товщина стінки графітового стакану підібрана таким чином, щоб не відбувалося повного екранування шихти від електромагнітних хвиль. Тому розплав в процесі плавки активно перемішується. Сам графітовий стакан з алундовим тиглем розміщуються в алундовій трубі, додатково ізольованій цирконовою ватою для кращої тепло- та електроізоляції від індуктора. Температуру розплаву вимірювали вольфрам-ренієвою термопарою ВР 5/20. Таким чином, виготовлена піч забезпечує плавку, інтенсивне перемішування розплаву та нагрів до температури вище 1800 °С, що достатньо для успішного приготування високоентропійних сплавів. Плавки здійснювали в середовищі очищеного аргону. Як вихідні матеріали використовували сплав ковар (Fe – 51,7 %; Ni – 29,8 %; Co – 17,26 % мас. %), сплав ВТ6 (Ti – 88,2 %; Al – 6,46 %; V – 4,63 % мас. %), а також високочисті метали: нікель, алюміній, хром та кобальт. Хід плавки: в холодний тигель додавали ковар, нікель та кобальт; піднімали температуру до 1500 °С, витримували 10 хвилин до повного розплавлення шихти, на 5 хвилин вмикали режим перемішування і вводили хром; після розчинення хрому вводили сплав ВТ6 та чистий алюміній. Після розплавлення та розчинення всіх компонентів сплав перегрівали над температурою ліквідус на 250-300 °С і витримували у рідкому стані не менше 10 хвилин, перемішували розплав в імпульсному режимі та виливали в металеву форму.

Для отримання надтвердих композитів використовували порошок високоентропійних сплавів (ВЕС), отриманий шляхом механічного подрібнення литих заготовок. Отриманий порошок характеризувався розміром частинок менше 20 мкм. Перед змішуванням порошок ВЕС

піддавали вакуумному прожарюванню з метою видалення адсорбованої вологи та газів, а також часткового відновлення поверхневих оксидів. Після цього порошок ВЕС змішували з порошком сBN у планетарному млині в рідкому середовищі (ізопропіловий спирт), що забезпечувало рівномірний розподіл компонентів, деагломерацію частинок і підвищення однорідності суміші. Попереднє механічне ущільнення порошкової суміші здійснювали в сталевій прес-формі за допомогою лабораторного гідравлічного пресу при зусиллі 2 т з витримкою 60 с. Формування та НРНТ-спікання зразків композитів проводили на установці високого тиску ДО-044 із центральною робочою вставкою АВТ типу «тороїд-30», виготовленою з твердого сплаву марки ВК6. Спікання здійснювали за таких умов: тиск – 7,7 ГПа; температура – 1400-2400 °С; витримка – 60 с.

Експериментальні дослідження теплофізичних характеристик проводили методом синхронного термічного аналізу (СТА) з використанням приладу STA 449F1 (NETZSCH). Точність вимірювання температури становила $\pm 1,5$ °С, відносна похибка визначення теплот становила 3 %.

Ультразвукові дослідження проводили в ІМФ НАН України (м. Київ) під керівництвом старшого наукового співробітника, к.ф.-м.н. О. І. Запорожця з використанням імпульсної ультразвукової установки. Методика проведення досліджень і обробки результатів наведена в роботі [4]. Вимірювання швидкостей поширення поздовжніх (v_l) і поперечних (v_t) ультразвукових хвиль здійснювали в частотному діапазоні 10-30 МГц при тривалості імпульсу 10 мкс з інструментальною похибкою 0,01 %. Щільність (ρ) визначали диференціальним методом гідростатичного зважування з використанням кварцового еталону з похибкою 0,01 % при масі зразка $1,75 \pm 0,01$ г, а також шляхом точного вимірювання геометричних розмірів за допомогою цифрового мікрометра. Розрахунок пружних характеристик виготовлених зразків – модуля Юнга (Е), модуля зсуву (G), модуля всебічного стиску (В) та коефіцієнта Пуассона (ν) – здійснювали за відомими співвідношеннями [4]:

$$G = \rho v_t^2 \quad (1)$$

$$E = 2GA \quad (2)$$

$$B = GA / 3(3-A) \quad (3)$$

$$\eta = E / 2G - 1 = (a^2 - 2) / 2(a^2 - 1), \quad (4)$$

де $A = (3a^2 - 4) / (a^2 - 1)$; $a = v_l / v_t$

Визначення твердості проводили методом індентування за Віккерсом відповідно до ДСТ ISO 6507-1 на приладі HVT-50. Випробування проводили при навантаженні на індентор 50 Н.

Тріщиностійкість (в'язкість руйнування) визначали за методом індентування. Для матеріалів із відомим модулем Юнга значення тріщиностійкості розраховували за формулою Бленделя на основі довжини радіальних тріщин:

$$K_{1c} = 0.0141(P/a^{3/2})(E/H_v)\log_{10}(8.4a/c) \tag{5}$$

де K_{1c} – тріщиностійкість, P – навантаження на індентор, a – половина довжини діагоналі відновленого відбитка, E – модуль Юнга, HV – твердість по Вікерсу, c – довжина радіальної тріщини.

Термограми плавлення розроблених сплавів наведено на рис. 2, а їх основні теплофізичні характеристики та твердість – в таблиці 2.

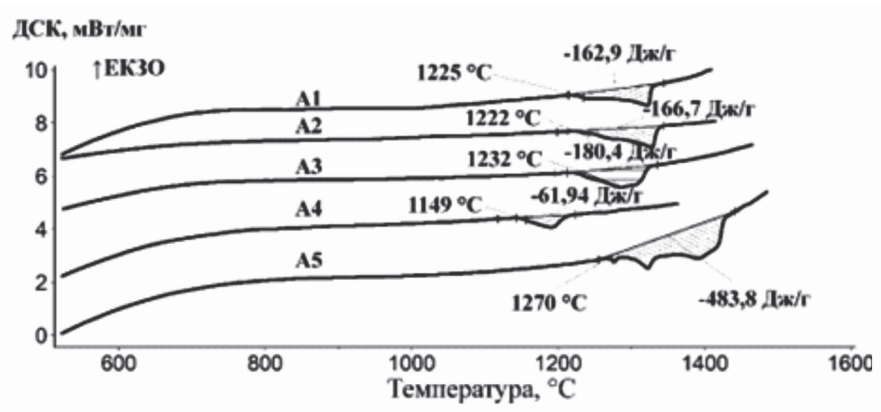


Рис. 2. ДСК-термограми плавлення сплавів. Номера на термограммах відповідають хімічному складу сплавів згідно табл. 1.

Fig. 2. DSC thermograms of alloy melting. The numbers on the thermograms correspond to the chemical compositions of the alloys according to Table 1.

Таблиця 2
Твердість та теплофізичні властивості отриманих сплавів

Table 2
Hardness and thermophysical properties of the obtained alloys

№ сплаву	HV	T _s , °C	T _L °C	ΔT °C	-ΔH, Дж/г
A1	395,4	1225,0	1325,0	100,0	162,9
A2	568,3	1221,8	1323,0	101,2	166,7
A3	375,5	1232,6	1339,4	106,8	180,4
A4	559,2	1149,0	1178,1	29,1	61,94
A5	602,8	1270,0	1416,2	146,2	483,8

T_s – температура солідус; T_L – температура ліквідус; ΔT – інтервал кристалізації; ΔH – теплота плавлення.

Як видно з результатів досліджень, сплави 1-3 характеризуються асиметричними піками плавлення, близькими значеннями температур ліквідусу і солідусу та невеликим інтервалом кристалізації, що свідчить

про їх двофазний характер із домінуванням однієї з фаз. Сплав 4 має симетричний пік плавлення, малий інтервал кристалізації та відносно низьку теплоту плавлення, що вказує на його евтектичну природу. Для сплаву 5 характерна наявність трьох піків плавлення, при цьому третій пік є асиметричним. Інтервал кристалізації значно розширений, а теплота плавлення є підвищеною, що свідчить про багатофазний характер цього сплаву.

Для дослідження взаємодії ВЕС з кубічним нітридом бору (сBN), отримані злитки сплавів були подрібнені до стружки, а потім розмелені до порошку за допомогою планетарного млина. Для цього використовували ємності та молотильні тіла з карбиду вольфраму. Отриманий порошок мав розмір частинок менше 20 мкм, та досліджувався без термообробки. Порошки сBN диспергувались в спирті за допомогою ультразвукової ванни та змішувалися з порошком ВЕС з використанням електромагнітної мішалки, таким чином готували суміш порошків у співвідношенні 30 % HEA/70 % сBN. Порошки висушували при температурі 110 °С. Дослідження взаємодії ВЕС з сBN проводили методом синхронного термічного аналізу (СТА) за допомогою приладу STA 449F1 фірми NETZSCH. В середовищі високочистого аргону при швидкості нагрівання 15 К/хв, при температурі до 1600 °С. Обробку отриманих експериментальних даних проводили за допомогою спеціального програмного забезпечення «Proteus analysis». Експерименти проводили в тиглях з Al_2O_3 ; фіксували зміну маси та теплові ефекти. Експерименти проводили в режимі: зразок + корекція. Як файл корекції використовували термограму сBN зняту при тих же режимах. В цьому режимі прилад автоматично враховував зміну ваги та теплоємності суміші порошків від аналогічних параметрів сBN в процесі нагрівання. Для порівняння окремо проводили контрольні дослідження чистого сBN та порошків ВЕС без сBN. Термограми взаємодії отриманих сплавів з сBN наведено на рис. 3, а ТГ криві втрати ваги в результаті взаємодії на рис. 4. Сплав 2 реагує з сBN

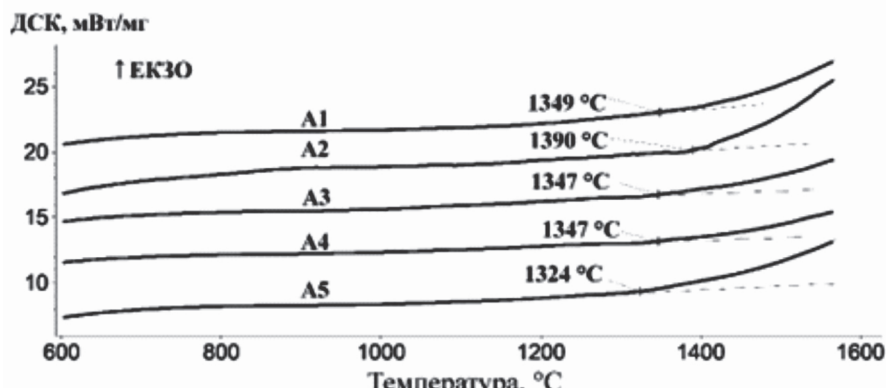


Рис. 3. ДСК-термограми взаємодії отриманих сплавів з сBN. Номера на термограмах відповідають хімічному складу сплавів згідно таблиці 1.

Fig. 3. DSC thermograms of the interaction of the obtained alloys with cBN. The numbers on the thermograms correspond to the chemical compositions of the alloys according to Table 1.

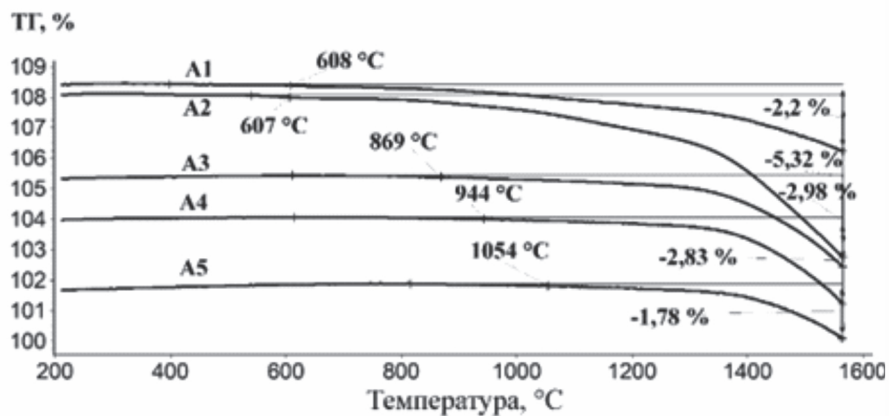
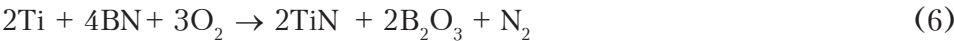


Рис. 4. ТГ-термограми втрати ваги при взаємодії отриманих сплавів з cBN. Номери на термограмах відповідають хімічному складу сплавів згідно таблиці 1.

Fig. 4. TG thermograms of weight loss during interaction of the obtained alloys with cBN. The numbers on the thermograms correspond to the chemical compositions of the alloys according to Table 1.

найактивніше, оскільки Ti у ньому “вільний” в γ -матриці і не зв’язаний у стабільні інтерметаліди тоді як в інших сплавах значна частина Ti знаходиться у B2 фазі. Таким чином, чим більше титану в твердому розчині тим більша його активність до взаємодії з cBN. Це підвищує хімічний потенціал Ti на контакті з cBN і полегшує його взаємодію. Температура початку втрати ваги для сплавів 1, 2 практично співпадає, для – сплавів 3, 4, 5 зростає із збільшенням номеру сплаву. Виходячи з отриманих результатів, по активності розроблених сплавів до взаємодії з cBN їх можна поставити в такий ряд: $2 > 1 > 3 > 4 > 5$. Параметри взаємодії порошків із розроблених сплавів з cBN наведено в таблиці 3. Так як досліджували високодисперсні порошки де завжди є невелика кількість сорбованого кисню то найвірогіднішою реакцією взаємодії буде:



Таблиця 3
Параметри взаємодії порошків BEC з cBN

Table 3
Interaction parameters of HEA powders with cBN

№ сплаву	T_1 , °C	T_2 , °C	Втрата ваги при взаємодії з cBN, %
A1	1349	608	2,15
A2	1390,8	607	5,22
A3	1347	869,8	2,96
A4	1347,1	943,9	2,83
A5	1324	1054,6	1,76
T_1 – температура різкої зміни теплоємності; T_2 – температура початку втрати ваги.			

Для проведення досліджень було виготовлено серію зразків надтвердих композиційних матеріалів на основі кубічного нітриду бору. Отримані композити характеризувалися щільною структурою та рівномірним розподілом фаз, що забезпечує їх придатність для подальших досліджень механічних та спеціальних властивостей. Зразки композитів мали циліндричну форму з геометричними параметрами: діаметр – 9,52 мм; висота – 4,97 мм

Результати досліджень розроблених та виготовлених надтвердих композитів наведені на рис. 5 і табл. 4.

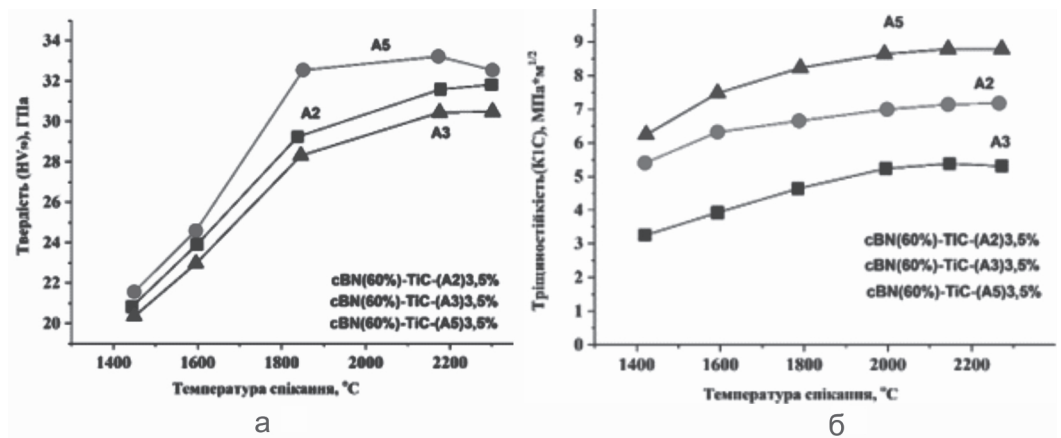


Рис. 5. Результати вимірювання твердості за Вікерсом (а) та тріщиностійкості (б) як функція температури спікання для надтвердих композитів cBN-BEC.

Fig. 5. Vickers hardness (a) and fracture toughness (б) as a function of sintering temperature for cBN-BEC superhard composites.

Таблиця 4
Властивості одержаних надтвердих композитів порівняно з аналогічними матеріалами.

Table 4
Properties of the obtained superhard composites compared with similar materials

Система	ρ , см ³	HV, ГПа	K_{Ic} МПа·м ^{1/2}	E, ГПа
РсBN зв'язка TiC випускається фірмою SECO, Швеція	4,09	35,7	7,1	558,9
РсBN зв'язка ZrN випускається фірмою SECO, Швеція	4,21	31,9	7,0	510,7
РсBN зв'язка TiC+BEC (A5)	4,38	33,2	8,7	630,0

Як видно з представлених результатів, розроблені надтверді композити на основі кубічного нітриду бору з добавками високоентропійних сплавів належать до високомодульних керамічних матеріалів, які за своїми характеристиками не поступаються аналогічним матеріалам провідних

зарубіжних виробників. Це свідчить про перспективність використання високоентропійних сплавів як зв'язуючого компонента в cBN-кераміці. ВЕС забезпечують ефективне зчеплення елементів cBN-матриці. Найвищі значення модуля Юнга продемонстрували PсBN-композити на основі сплавів А2 та А5.

Значення тріщиностійкості (K_{IC}) досліджених композитів досягають 8-9 МПа · м^{1/2}, що є високим показником для дрібнозернистої інструментальної кераміки. Це пояснюється, насамперед, наявністю у міжзерновому просторі cBN-матриці мікронних включень ВЕС, які виконують роль центрів відхилення та гасіння магістральних тріщин. Під час поширення тріщини відбувається її відхилення на межах розділу фаз cBN – ВЕС, що збільшує ефективну довжину траєкторії руйнування та потребує додаткових витрат енергії. Крім того, пластичні включення ВЕС можуть реалізовувати механізм «місткового зв'язування», перешкоджаючи розкриттю тріщини та підвищуючи опір руйнуванню матеріалу.

Висновки

1. Розроблено серію високоентропійних сплавів системи Ni – Fe – Cr – Co – Ti–Al із різним вмістом алюмінію, що дозволило отримати сплави з різним фазовим складом: двофазні, евтектичні та багатофазні.

2. За результатами ДСК-досліджень встановлено, що фазовий склад сплавів визначає їх реакційну здатність до взаємодії з кубічним нітридом бору. Показано, що підвищена активність характерна для сплавів, у яких титан перебуває у ГЦК твердому розчині, тоді як його зв'язування в упорядкованих ОЦК фазах знижує реакційну здатність.

3. Встановлено, що інтенсивність взаємодії ВЕС з cBN зменшується в ряду: 2 > 1 > 3 > 4 > 5, що корелює зі станом титану в структурі сплавів.

4. Отримано надтверді cBN-композити з використанням розроблених ВЕС, які характеризуються високими значеннями механічних властивостей: твердість до 33 ГПа, модуль Юнга до 630 ГПа та тріщиностійкість на рівні 8-9 МПа · м^{1/2}.

5. Показано, що підвищення тріщиностійкості обумовлене реалізацією механізмів відхилення тріщин та мостикового зв'язування, що забезпечується наявністю мікронних включень ВЕС у міжзерновому просторі cBN-матриці.

6. Встановлено, що застосування високоентропійних сплавів як зв'язуючої фази дозволяє отримати надтверді композиційні матеріали з комплексом властивостей, що не поступаються, а в окремих випадках перевищують властивості промислових PсBN-матеріалів.

Література

1. Tu L., An Q., Ming W., Chen M., Yu D. Adhesion and diffusion mechanisms of the cBN tools in the high-speed cutting of nickel-based superalloys // *Wear*. 2025. Vol. 576-577. Art. 206069. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206069>
2. Liu Y., Zhang W., Peng Y., Fan G., Liu B. Effects of TiAl alloy as a binder on cubic boron nitride composites // *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 21. Art. 6335. <https://doi.org/10.3390/ma14216335>

3. Zhang Y. et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 61. P. 1-93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
4. Zaporozhets O. I., Mordyuk B. N., Dordienko N. A., Mykhailovsky V. A., Mazanko V. F., Karasevskaya O. P. Ultrasonic studies of texture inhomogeneities in pressure vessel steel subjected to ultrasonic impact treatment and shock compression // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307, Part A. P. 693-701. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.053>

References

1. Tu, L., An, Q., Ming, W., Chen, M., & Yu, D. (2025). Adhesion and diffusion mechanisms of the cBN tools in the high-speed cutting of nickel-based superalloys. *Wear*, 576-577, 206069. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206069>
2. Liu, Y., Zhang, W., Peng, Y., Fan, G., & Liu, B. (2021). Effects of TiAl alloy as a binder on cubic boron nitride composites. *Materials*, 14(21), 6335. <https://doi.org/10.3390/ma14216335>
3. Zhang, Y., et al. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1-93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
4. Zaporozhets, O. I., Mordyuk, B. N., Dordienko, N. A., Mykhailovsky, V. A., Mazanko, V. F., & Karasevskaya, O. P. (2016). Ultrasonic studies of texture inhomogeneities in pressure vessel steel subjected to ultrasonic impact treatment and shock compression. *Surface and Coatings Technology*, 307 (Part A), 693-701. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.053>

Одержано / Received 16.04.26

Прийнято до друку / Accepted 25.05.26

Опубліковано / Published 31.05.26

Superhard Composite Materials Based on Cubic Boron Nitride with Activating Additives of High-Entropy Alloys

O. A. Shcheretskyi¹, Doctor of Technical Sciences, Leading Research Scientist,
07shch@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9030-876X>

V. O. Shcheretskyi^{1,2}, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
rnmptima@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>

V. Z. Turkevych³, Academician of NAS of Ukraine, Professor, Director,
vturk@ism.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1441-4269>

D. A. Stratiichuk³, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
dialab@ism.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4911-5629>

¹Physico-technological Institute of Metals and Alloys, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³V. Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

This study investigates the possibility of using high-entropy alloys (HEAs) as a binder phase in cubic boron nitride (cBN)-based superhard composite materials. A series of Ni – Fe – Cr – Co – Ti – Al system alloys with varying aluminum content was developed and melted, ensuring the formation of single-phase, two-phase, eutectic, and multiphase structures. The relevance of this work is driven by the need to overcome the limitations of traditional metallic and ceramic binders (insufficient wettability, brittleness, high sintering temperatures) for the development of efficient cutting tools. The aim of this work is to establish the influence of the phase composition of HEAs on their reactivity with cBN and to assess the application potential of such alloys as a binder phase for cBN-based superhard composite materials. Five alloys with different aluminum contents were melted. Using methods of synchronous thermal analysis (DSC/TG), ultrasonic spectroscopy, and high-pressure (7.7 GPa) high-temperature sintering, the thermophysical properties of the alloys, their interaction with cBN, as well as the mechanical characteristics of the superhard composite materials (Vickers hardness, Young's modulus, fracture toughness) were investigated. It was found that the phase composition significantly affects the reactivity of the alloys with cBN. It was shown that maximum interaction activity is characteristic of alloys in which titanium is in solid solution, whereas its concentration in ordered phases (of the B2 type) reduces reactivity. Superhard cBN composites were obtained by high-temperature pressing at a pressure of 7.7 GPa and temperatures up to 2200 °C. It was established that the developed materials are characterized by high values of hardness, Young's modulus, and fracture toughness ($K_{IC} = 8-9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), which are comparable to or exceed those of industrial materials. It was shown that the increased fracture toughness is due to the implementation of crack deflection and crack bridging mechanisms facilitated by micron-sized HEA inclusions in the intergranular space of the cBN matrix.

The obtained results confirm the promise of using high-entropy alloys as an effective binder for the creation of a new generation of superhard composite materials.

Keywords: High-entropy alloys, cBN composites, induction melting, high-temperature sintering, reaction interaction.