

УДК 661.657.5; 621.762.5

М. П. Беженар, Л. М. Девін, доктори технічних наук; Я. М. Романенко, інж.;
О. В. Осадчий, Т. О. Гарбуз, С. М. Коновал, кандидати технічних наук

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

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ І ДЕМПФУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ НАДТВЕРДИХ PCBN КОМПОЗИТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД УМОВ ОДЕРЖАННЯ

Досліджено фізико-механічні та демпфуючі властивості (твердість, густина, електропровідність, модуль Юнга, добротність, логарифмічний декремент затухання, межа міцності на розтяг, питома енергія руйнування) PCBN композитів, отриманих реакційним спіканням при високому тиску порошоків систем cBN–Al та cBN–TiB₂–Al в залежності від складу шихти і параметрів спікання.

Ключові слова: кубічний нітрид бору, тиск, температура, шихта, алюміній, реакційне спікання, твердість, добротність, логарифмічний декремент затухання, модуль Юнга, густина, електропровідність.

Вступ

Полікристалічні матеріали кубічного нітриду бору (PCBN) це широкий клас композитів, які на світовому ринку майже виключно розробляють і випускають для інструментального призначення у вигляді ріжучих пластин. Інструмент з PCBN не має конкуренції при обробці різанням вуглецевих і легованих сталей, чавунів, багатьох високолегованих спецсплавів завдяки високій термічній стійкості і хімічній нейтральності до сплавів на основі заліза [1]. Один з способів одержання PCBN матеріалів – реакційне спікання порошоків кубічного нітриду бору з алюмінієм в умовах високого тиску [2]. Для покращення функціональних властивостей надтвердих PCBN, при спіканні застосовують легуючі добавки. Найпридатніші для цього тугоплавкі сполуки титану. Наприклад, використання в якості легуючої добавки дибориду титану сприяє зміцненню структури композиту завдяки деформаційному зміцненню матричної фази cBN, модифікації зв'язки композиту, утворенню твердих розчинів на базі фази TiB₂, і, як результат, збільшення твердості і зносостійкості ріжучих пластин з композиту [3, 4].

Однією з причин, що ускладнюють широке використання високошвидкісних методів обробки, є вібрації, які виникають під час різання металів і призводять до прискореного, часто катастрофічного зношування інструменту [1]. Для конструкційних та інструментальних матеріалів вібрації є майже постійним супроводжувальним фактором нормальної експлуатації. Зменшити шкідливий вплив вібрацій можна, використовуючи матеріали з підвищеними демпфуючими властивостями. Тому поряд з використанням в якості підкладок під різальну пластину сплавів з високим внутрішнім тертям (сплавів високого демпфування) важливо знати і демпфуючі властивості самого інструментального матеріалу і їх залежність від технологічних чинників отримання матеріалу.

Метою даної роботи було дослідження впливу технології одержання PCBN композитів систем cBN–Al та cBN–TiB₂–Al (тиску та температури спікання, складу шихти) на їх фізико-механічні та демпфуючі властивості.

Методи досліджень

Дослідні зразки одержували при реакційному спіканні мікропорошків cBN марки кубоніт зернистостей 7/5 і 14/10 (розмір зерен від 5 до 7 мкм в першому випадку і від 10 до 14 мкм в другому) з порошками алюмінію марки АСД з розміром зерен менше 40 мкм і дибориду титану з розміром зерен від 1 до 3 мкм. Проведено дві серії дослідів: перша – шихта складу cBN–Al, кількість Al від 10 до 20 % за масою; друга – шихта складу cBN–Al–TiB₂, кількість Al–10 % за масою, TiB₂ – від 5 до 25 % за масою. Спікання проводили в апаратах високого тиску «тороїд» при тиску 7,7 ГПа і температурі 2300 К та «чечевиця» при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К.

Після спікання і механічної обробки (плоске шліфування та кругління алмазним абразивом) зразки мали правильну геометричну форму (циліндри). Розміри зразків, одержаних в апараті високого тиску (АВТ) «чечевиця КЗ-35» – 10,5 мм за діаметром і 3,2 мм за висотою, а в АВТ «тороїд-20» – 7,5 мм за діаметром і 2,5 мм за висотою.

Структуру та фазовий склад вивчали методами рентгеноструктурного аналізу (дифрактометр ДРОН-3, CuK α -випромінювання, зйомка в дискретному режимі: крок сканування 0,05°, експозиція 3 с, кутовий інтервал 20-140°).

Густину зразків визначали точним вимірюванням їх діаметра, висоти та маси; точність визначення густини становила 0,3%.

Твердість визначали методом інденування з використанням алмазної піраміди Кнупа при навантаженні на індентор 10 Н.

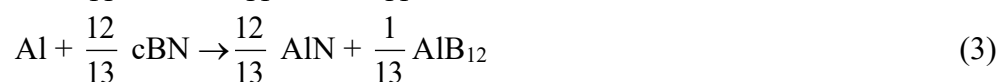
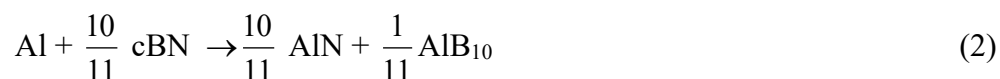
Акусторезонансним методом визначали модуль пружності та демпфуючі властивості (добротність, логарифмічний декремент затухання).

На установці „Копер” для досліджуваних композитів були визначені межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні зразка і питома енергія руйнування.

Електричний опір вимірювали з використанням цифрового омметра ЩЗ4, призначеного для діапазону 10⁻³–10⁹ Ом. Відносна інструментальна похибка в досліджуваному діапазоні вимірювань становила до 5%.

Результати досліджень та їх обговорення

При спіканні порошків кубічного нітриду бору з алюмінієм відбувається хімічна взаємодія між компонентами шихти. При цьому в результаті реакційної взаємодії в зв'язці композиту ідентифікується нітрид алюмінію і бориди, згідно з реакціями (1) – (3), причому можливо як утворення одного з приведених нижче боридів, так і кілька зразу, це залежить від термобаричних умов хімічної взаємодії і кінетичних чинників [5].



Для випадку спікання композитів cBN при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К (робочі параметри АВТ КЗ-35) в складі композиту фіксується як правило нітрид і диборид алюмінію. В табл. 1 приведено фазовий склад досліджуваних композитів, визначений методом рентгенодифракційного аналізу, для порівняння в таблиці приведено також розрахований фазовий склад композитів.

Таблиця 1. Фазовий склад надтвердих композитів, одержаних реакційним спіканням кубічного нітриду бору з алюмінієм при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К

Склад шихти мас. %		Фазовий склад полікристалів, мас. %						
		Розрахований за балансом реакції			Визначений методом рентгенодифракційного аналізу			
cBN	Al	cBN	AlN	AlB ₂	cBN	AlN	AlB ₂	Al
90	10	84	10	6	84	15	1	-
88	12	81	12	7	81	13	6	-
85	15	76	15	9	76	16	7	1
82	18	71	18	11	72	14	11,5	2,5
80	20	68	20	12	70	14	12,5	3,5

Для досліджуваних зразків були визначені густина, твердість за Кнупом, питомий електричний опір, модуль Юнга, логарифмічний декремент затухання та зв'язана з ним добротність механічної системи, межа міцності на розтяг при діаметральному стисненні зразка, питома енергія руйнування. В табл. 2 і 3 приведені властивості досліджуваних композитів, а на рис. 1–3 – залежність логарифмічного декременту затухання, добротності, модуля Юнга, межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні зразку та питомої енергії руйнування від вмісту алюмінію в шихті для спікання. В табл. 3 приведено також розраховане значення модуля Юнга, розрахунок проводився за формулою (4) [6]

$$E_g^* = \prod_i E_i^{C_i} \quad (4)$$

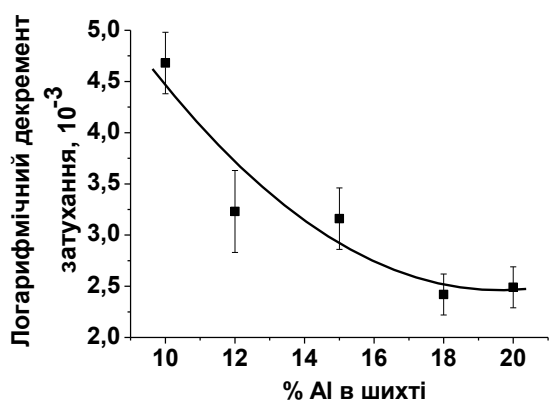
де E_g – модуль пружності композиту, E_i – модулі пружності окремих фаз композиту, C_i – об'ємний вміст фаз в композиті. Значення модуля Юнга для складових композиту наступні: для cBN – 909 ГПа [7]; для AlN – 350 ГПа [8]; для AlB₂ – 215 ГПа [9]; для Al – 70 ГПа [10].

Таблиця 2. Густина, твердість модуль Юнга та питомий електричний опір надтвердих композитів, одержаних реакційним спіканням кубічного нітриду бору з алюмінієм при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К

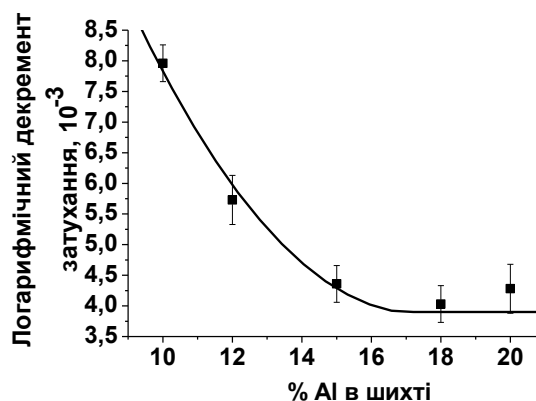
Склад шихти мас. %		Фазовий склад композитів, об. %				$E_{розр.},$ ГПа	$E_{експер.},$ ГПа	$\rho_{екс.}/\rho_{теор.}$	HKN, ГПа	R, Ом·м
		cBN	AlN	AlB ₂	Al					
90	10	82,3	16,4	1,2	0	759	606	0,986	32	10 ⁶
88	12	78,7	14,1	7,2	0	716	613	0,996	35	3*10 ⁵
85	15	73,2	17,2	8,3	1,2	656	581	0,998	33	5*10 ²
82	18	68,6	14,9	13,5	3,1	604	537	0,998	30	3*10 ⁻²
80	20	66,3	14,8	14,6	4,3	573	535	0,998	27	10 ⁻²

Таблиця 3. Добротність, логарифмічний декремент затухання, межа міцності на розтяг та питома енергія руйнування композитів, одержаних реакційним спіканням кубічного нітриду бору з алюмінієм при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К

Склад шихти мас. %		Резонансна частота, кГц	Швидкість звуку, м/с	Добротність	Логарифмічний декремент затухання, 10^{-3}	Межа міцності на розтяг, МПа	Питома енергія руйнування, кДж/м ²
cBN	Al						
90	10	297	13385	400	7,96	350	13,6
88	12	291	13471	595	5,73	375	15,1
85	15	282	13108	730	4,36	360	16,2
82	18	271	12694	780	4,10	320	15,4
80	20	277	12716	760	4,25	355	14,6

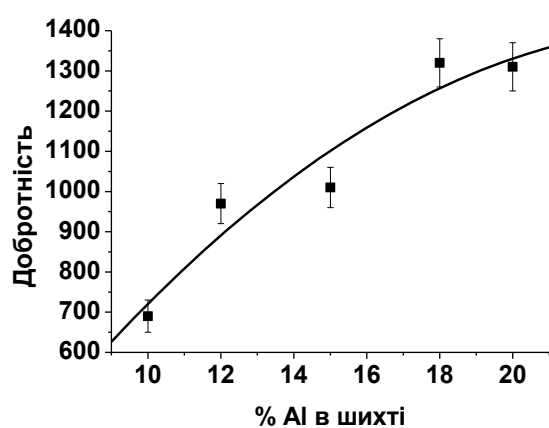


а

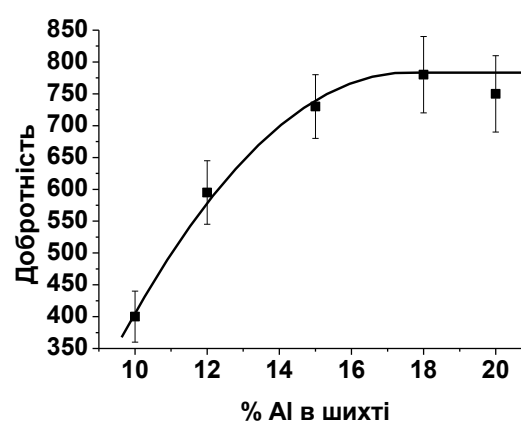


б

Рис. 1. Залежність логарифмічного декремента затухання від вмісту алюмінію в шихті для зразків, одержаних в АВТ «тороїд» (а) та КЗ-35 (б)



а



б

Рис. 2. Залежність добротності від вмісту алюмінію в шихті для зразків, одержаних в АВТ «тороїд» (а) та КЗ-35 (б)

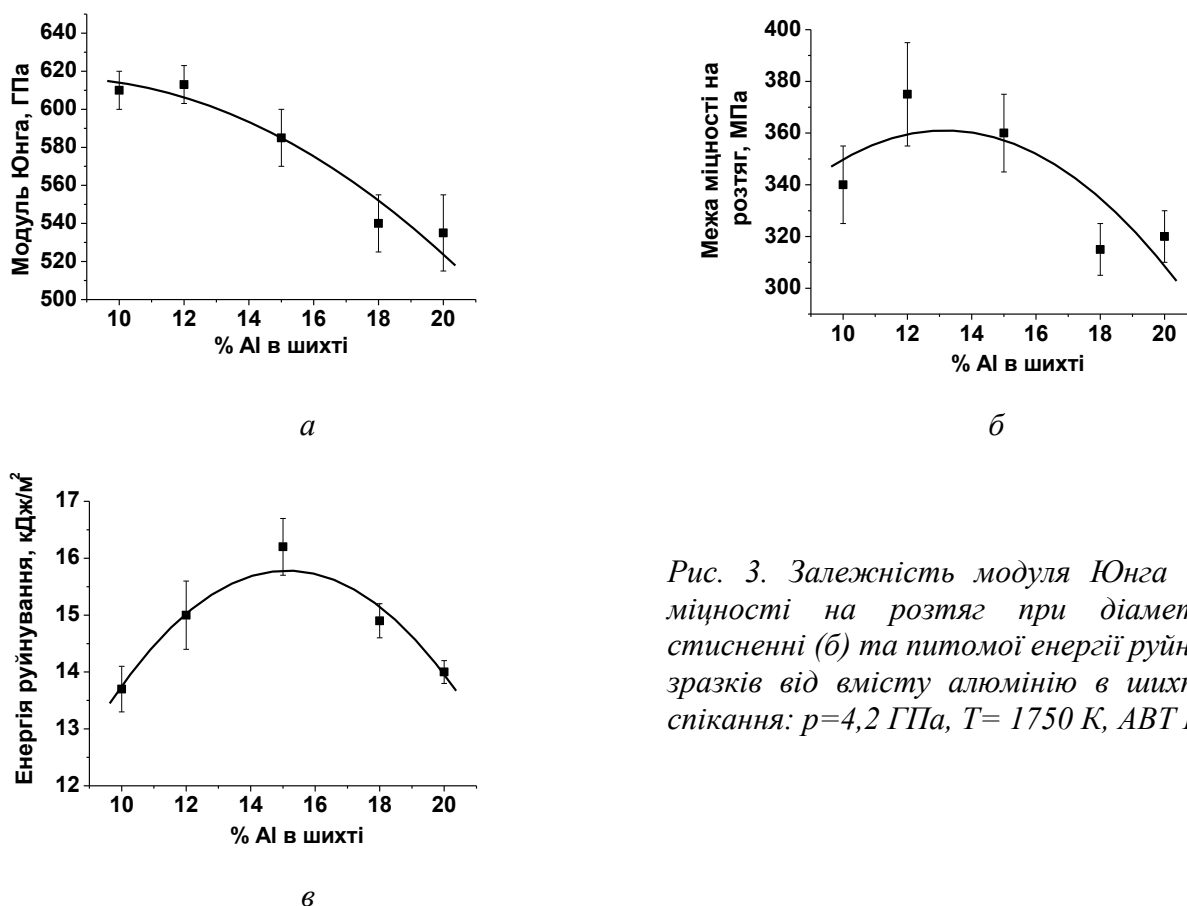
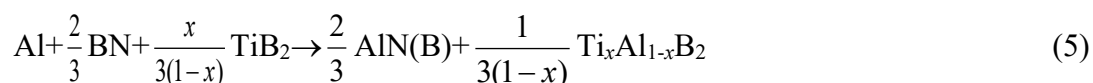


Рис. 3. Залежність модуля Юнга (а), межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні (б) та питомої енергії руйнування (в) зразків від вмісту алюмінію в шихті. Умови спікання: $p=4,2$ ГПа, $T=1750$ К, АВТ КЗ-35.

Аналіз результатів, приведених в табл. 1–3 та на рис. 1–3 дозволяє стверджувати наступне: для надтвердих cBN композитів, одержаних з вихідних мікропорошків кубічного нітриду бору марки кубоніт з розміром зерен від 5 до 7 мкм (КМ 7/5) при реакційному спіканні з алюмінієм в умовах високих тиску та температури (4,2 ГПа, 1750 К) фазовий склад, структура і властивості надзвичайно чутливі до такого чинника, як кількість алюмінію в шихті для спікання. Існує оптимальна для даних p , T умов одержання композиту і зернистості вихідного порошку cBN кількість алюмінію, яка забезпечує хімічну взаємодію при спіканні з утворенням дибориду алюмінію [11], тобто заданий фазовий склад композиту, при цьому пори в структурі композиту практично відсутні. Для випадку використання як вихідного порошку кубоніту марки КМ 7/5 кількість Al в шихті повинна бути не менше 12%, про що і свідчать дані табл. 1. Пористість композитів, одержаних з шихти з кількістю Al 12% і більше практично нульова, в той час як для випадку 10% Al в шихті пористість близько 1,5%, розрахований і визначений експериментально фазовий склад практично співпадають (в межах похибки), твердість, модуль Юнга, межа міцності на розтяг і питома енергія руйнування максимальні. Варто зауважити, що розрахований за формулою (4) модуль Юнга композиту закономірно зменшується зі зменшенням кількості cBN в композиті, в той час як експериментально одержана залежність модуля Юнга від кількості cBN в композиті (кількості алюмінію в шихті) – крива з максимумом при 12% Al в шихті. Такі розбіжності пов'язані з тим, що формула (4) працює для безпористого композиту (а при кількості Al в шихті 10% в нас пористість 1,5%), крім того, вона не враховує структурних чинників для

даного конкретного композиту, наприклад міцності міжзеренних контактів, дефектності субструктури. Що стосується логарифмічного декременту затухання і пов'язаної з ним добротності (обернена залежність), то найнижчі значення добротності і відповідно найвищий декремент затухання відмічено для композиту, одержаного з шихти з 10 % Al, що можна пояснити залишковою пористістю і недосконалістю міжзеренних контактів в структурі композиту. Варто відмітити, що для композитів, одержаних в АВТ «тороїд» при вищих тиску і температурі добротність вища, а логарифмічний декремент затухання нижчий, ніж для композитів, одержаних в АВТ КЗ-35 (див. рис.1, 2).

При спіканні порошків кубічного нітриду бору з алюмінієм і диборидом титану хімічна взаємодія між компонентами шихти проходить по реакції (5)



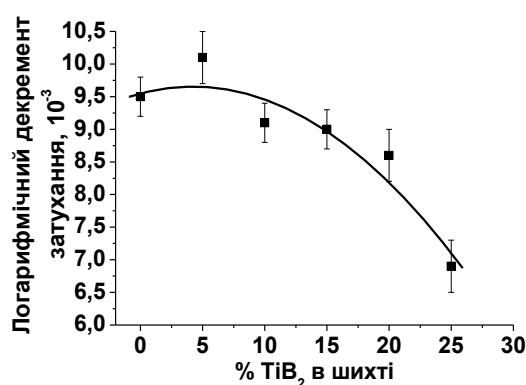
де x – доля TiB_2 в твердому розчині і відповідно $1-x$ доля AlB_2 . Добавка TiB_2 в шихту активує спікання, модифікує зв'язку композиту, сприяє утворенню твердих розчинів структурного типу AlB_2 і сприяє зміцненню структури композиту [12]. Досліджувались композити системи $\text{cBN} - \text{Al} - \text{TiB}_2$, одержані як в АВТ тороїд (параметри спікання композитів 7,7 ГПа по тиску і 2300 К по температурі), так і в АВТ КЗ-35 (параметри спікання композитів 4,2 ГПа по тиску і 1750 К по температурі). В табл. 4 приведені характеристики полікристалів, отриманих в системі $\text{cBN}-\text{Al}-\text{TiB}_2$ (склад шихти, фазовий склад, твердість, відносна густина, питомий електроопір, модуль Юнга (експеримент та розрахунок) в АВТ КЗ-35, а в табл. 5 ті ж характеристики, одержані в АВТ «тороїд». На рис. 4–7 приведені залежності логарифмічного декременту затухання, добротності, модуля Юнга, межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні, твердості та питомої енергії руйнування зразків від вмісту дибориду титану в шихті для спікання та термобаричних умов спікання. В табл. 3 приведено також розраховане значення модуля Юнга,

Таблиця 4. Фазовий склад, твердість, відносна густина, питомий електроопір, модуль Юнга (експеримент та розрахунок) дослідних зразків системи $\text{cBN}-\text{Al}-\text{TiB}_2$, одержаних при тиску 4,2 ГПа і температурі 1750 К

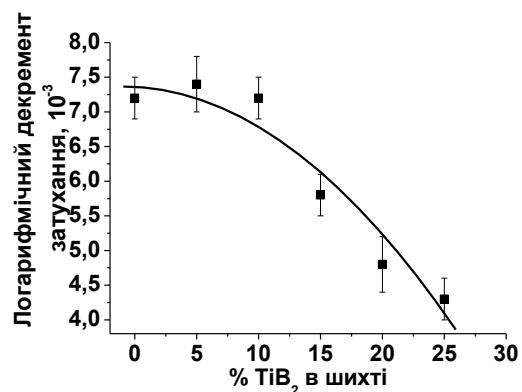
Склад шихти мас. %			Фазовий склад композитів, об. %				$\rho_{\text{відн}}$	H_{KN} , ГПа	R , Ом·м	$E_{\text{експер}}$, ГПа	$E_{\text{розр}}$, ГПа
cBN	Al	TiB ₂	cBN	AlN	Ti _x Al _{1-x} B ₂	Al					
90	10	0	82,0	18,0	0	-	0,978	29	10 ²	610	750
85	10	5	81,6	10,1	8,4	-	0,980	32	5·10 ⁻¹	590	750
80	10	10	72,9	13,6	13,5	-	0,982	35	10 ⁻¹	595	720
75	10	15	68,0	11,6	19,9	0,5	0,984	30	2·10 ⁻²	570	690
70	10	20	66,8	6,0	24,4	2,8	0,988	27	5·10 ⁻³	560	675
65	10	25	61,5	4,7	29,6	4,2	0,991	24	2·10 ⁻³	510	650

Таблица 5. Фазовий склад, твердість, відносна густина, питомий електроопір, модуль Юнга (експеримент та розрахунок) дослідних зразків системи cBN–Al–TiB₂, одержаних при тиску 7,7 ГПа і температурі 2300 К

Склад шихти мас. %			Фазовий склад композитів, об. %			$\rho_{\text{відн}}$	H_{KN} , ГПа	R , Ом·м	$E_{\text{експер}}$, ГПа	$E_{\text{розра}}$, ГПа
cBN	Al	TiB ₂	cBN	AlN	Ti _x Al _{1-x} B ₂					
90	10	0	85,8	14,2	0	0,983	30	10 ⁷	660	790
85	10	5	78,8	10,8	10,4	0,990	33	5·10 ⁵	645	730
80	10	10	74,7	10,9	14,4	0,992	35	50	665	715
75	10	15	70,4	11,1	18,5	0,995	32	3·10 ⁻²	640	699
70	10	20	66,1	11,3	22,6	0,997	29	3·10 ⁻³	635	683
65	10	25	61,6	11,5	26,9	0,998	25	2·10 ⁻³	600	666

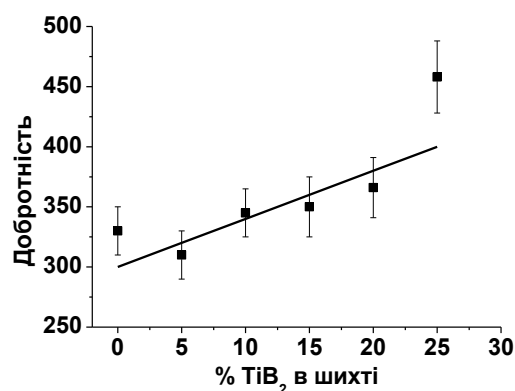


а

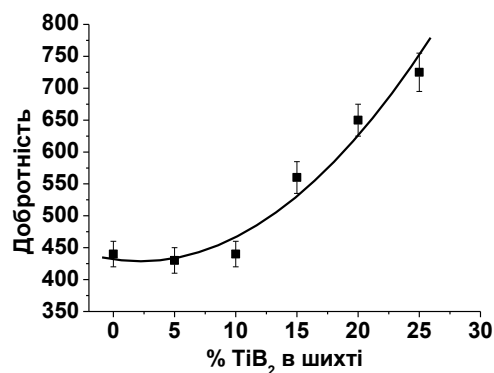


б

Рис. 4. Залежність логарифмічного декременту затухання від вмісту дибориду титану в шихті для зразків, одержаних в АВТ «тороїд» (а) та КЗ-35 (б)

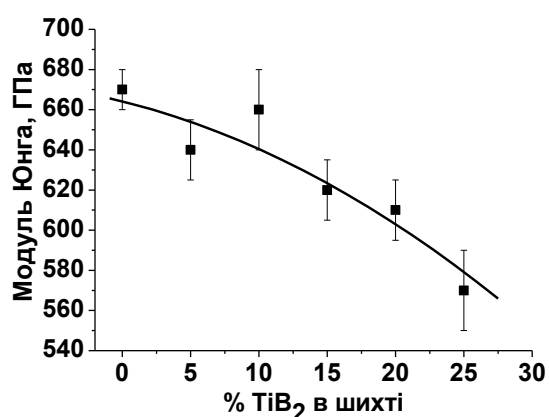


а

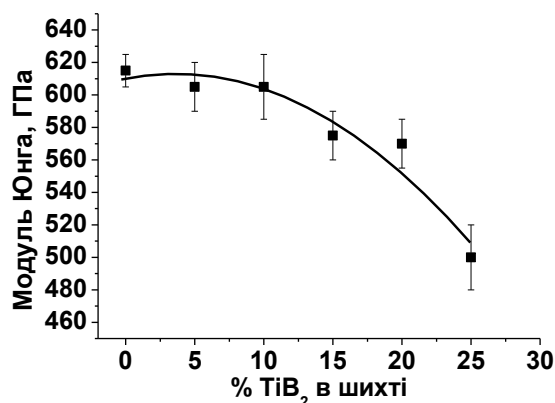


б

Рис. 5. Залежність добротності від вмісту дибориду титану в шихті для зразків, одержаних в АВТ «тороїд» (а) та КЗ-35 (б)

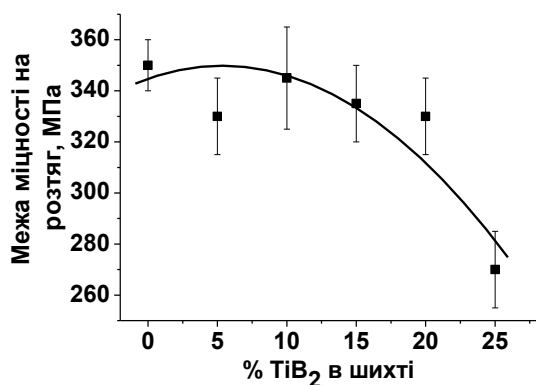


а

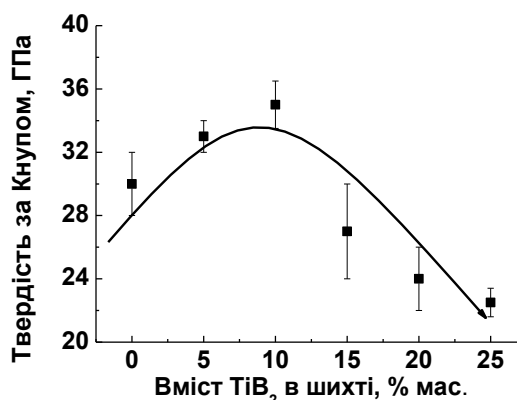


б

Рис. 6. Залежність модуля Юнга від вмісту дибориду титану в шихті для зразків, одержаних в АВТ «тороїд» (а) та КЗ-35 (б)



а



б

Рис. 7. Залежність межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні (а) та твердості (б) від вмісту дибориду титану в шихті для зразків, одержаних в КЗ-35

Для композитів системи сBN–Al–TiB₂ характер залежностей фізико-механічних властивостей від вмісту дибориду титану в шихті (табл. 4, 5, рис. 4–7) подібний до таких в композитів системи сBN–Al. Оптимальна для даних p, T умов одержання композиту і зернистості вихідного порошку сBN кількість дибориду титану, яка забезпечує повне проходження хімічної взаємодії між компонентами шихти (відсутність вільного алюмінію в композиті) і зміцнення структури композиту – це 5–10%. При такому складі шихти маємо максимальні значення твердості, модуля Юнга, межі міцності на розтяг при діаметральному стисненні зразка, максимальний логарифмічний декремент затухання (мінімальну добротність механічної системи). Варто відмітити, що для композитів, одержаних в АВТ «тороїд» при вищих тиску і температурі добротність вища, а логарифмічний декремент затухання нижчий, так, як і для системи сBN–Al.

Таким чином, дослідні зразки систем сBN–Al та сBN–Al–TiB₂ мають високі демпфуючі властивості в порівнянні з іншими інструментальними матеріалами

(інструментальна сталь, твердий сплав ВК8). В табл. 6 приведено значення для добротності і логарифмічного декременту затухання для зразків оптимального фазового складу в порівнянні з демпфуючими властивостями відомих матеріалів.

Таблица 6. Демпфуючі характеристики матеріалів

Матеріал	Добротність Q	Логарифмічний декремент затухання δ , 10^{-3}
Сталь	1230±51	2,33±0,1
ВК8 (WC–6 % Co)	998±32	3,2±0,2
Нікелід титану	63±6	50,5±4,3
cBN–Al (тороїд-20)	680±25	4,7±0,2
cBN–Al (КЗ-35)	400±20	8,0±0,2
cBN–Al–TiB ₂ (тороїд-20)	430±20	7,5±0,3
cBN–Al–TiB ₂ (КЗ-35)	310±20	10,5±0,3

Висновки

Методом акустичного резонансу визначено демпфуючі властивості та модуль Юнга полікристалів КНБ, одержаних реакційним спіканням при високому тиску кубічного нітриду бору з алюмінієм.

Встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію в шихті підвищується добротність полікристалів і відповідно зменшується логарифмічний декремент затухання, тобто найкращі демпфуючі властивості у полікристалів з максимальною кількістю cBN.

Залежність модуля Юнга від фазового складу композиту (складу шихти) – крива з екстремумом, максимум відповідає кількості алюмінію в шихті (12%) яка забезпечує одержання однорідного безпористого полікристалу cBN. При меншому вмісті алюмінію в шихті (<12%) в складі полікристалу області з підвищеною пористістю, загальна пористість більша 1%, при більшому – неповна диспергація алюмінію на стадії просочення при спіканні і як результат – в полікристалі залишковий алюміній. Обидва фактори сприяють зниженню модуля пружності.

Твердість полікристалів, як і модуль пружності – крива з максимумом при 12% Al в шихті, питомий електроопір закономірно зменшується зі збільшенням Al в шихті.

Межа міцності на розтяг при діаметральному стисненні зразка і питома поверхня руйнування максимальні для зразків, що одержані з шихти з вмістом 12 і 15% Al відповідно.

Для композитів, одержаних при спіканні порошків системи cBN–Al–TiB₂ максимальні твердість, модуль Юнга, добротність, межа міцності на розтяг при вмісті дибориду титану 5–10 %, при таких умовах відбувається максимальне зміцнення структури композиту.

Исследованы физико-механические и демпфирующие свойства (твердость, плотность, электропроводность, модуль Юнга, добротность, логарифмический декремент затухания, предел прочности на растяжение, удельная энергия разрушения) PCBN композитов, полученных реакционным спеканием при высоком давлении порошков систем cBN–Al и cBN – TiB₂ – Al в зависимости от состава шихты и параметров спекания.

Ключевые слова: кубический нитрид бора, давление, температура, шихта, алюминий, реакционное спекание, твердость, добротность, логарифмический декремент затухания, модуль Юнга, плотность, электропроводность.

THE PHYSICAL-MECHANICAL AND DAMPING PROPERTIES PCBN SUPERHARD COMPOSITE DEPENDING ON THE CONDITIONS FOR THEIR PREPARATION

It was investigated physics and mechanical damping properties (hardness, density, conductivity, Young's modulus, quality factor, logarithmic decrement damping, tensile strength, destruction specific energy) PCBN composites obtained by reaction sintering powders at high pressure, systems cBN–Al and cBN–TiB₂–Al depending on the mixture and parameters sintering.

Key words: cubic boron nitride, pressure, temperature, mixture, alyuminiy, reaction sintering, hardness, quality factor, logarithmic decrement damping, Young's modulus, density, conductivity.

Література

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. – Обработка материалов лезвийным инструментом. / Под ред. С. А. Клименко. – Киев: ИСМ им В. Н. Бакуля; ИПЦ «Алкон» НАНУ, 2006. – Т. 5. – 316 с.
2. Киборит: получение, структура, свойства, применение / Н. В. Новиков, А. А. Шульженко, Н. П. Беженар, и др. // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 2. – С. 40–51.
3. Гарбуз Т. О., Беженар М. П., Божко С. А. Композит кубічного нітриду бору, модифікований диборидом титану // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. – Вып. 11. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2008. – С. 202–205.
4. Беженар М. П., Божко С. А., Гарбуз Т. О., Коновал С. М. Композити кубічного нітриду бору, зміцнені тугоплавкими боридами // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2009. – Вып. 12. – С. 223–234.
5. Фазовый состав поликристаллов, полученных при реакционном спекании кубического нитрида бора с алюминием / Н. П. Беженар, С. А. Божко, Н. Н. Белявина и др. // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 1. – С. 37–48.
6. Композиты cBN, упрочненные высокомолекулярными боридами / Т. А. Гарбуз, Н. П. Беженар, С. А. Божко и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2010. – Вып. 13. – С. 332–337.
7. Mark P. D'Evelyn, Kornelija Zgonc. Elastic properties of polykrystalline cubic boron nitride and diamond by dynamic resonance measurements. *Diamond Relat. Mater.* – 1997. – 6. – P. 812–816.
8. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения (справочник). – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
9. Loa I., Kunc K., Syassen K., Bouvier P. Crystal structure and lattice dynamics of AlB₂ under pressure and implications for MgB₂. – ArXiv cond-mat/ 0206051 vol. 1. – 5 Juni 2002.
10. Свойства элементов: Справочник. В 2-х частях. Ч. 1. Физические свойства / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
11. Коновал С. М., Беженар М. П. Структурні неоднорідності надтвердих композитів системи cBN–Al // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. научных трудов ИСМ НАН Украины. – К.: Логос, 2010. – С. 107–112.
12. Особенности кристаллической структуры диборида титана, образующегося в сверхтвердых композитах системы cBN–Al–TiB₂ / Н. П. Беженар, С. А. Божко, Т. А. Гарбуз и др. // Сверхтв. Материалы. – 2008. – № 3. – С. 92–95.

Надійшла 28.07.16.