

Микола БЕЖЕНАР, д-р техн. наук; **Андрій ПАЦИК** аспір.;
Олександр СОКОЛОВ, **Ярослав РОМАНЕНКО** кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074, м. Київ, e-mail: pacik.andr@gmail.com, bezhenar@ukr.net*

ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ РСВН КОМПОЗИТІВ, ВИЗНАЧЕНА МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ ПІРАМІДОЮ ВІККЕРСА

Методом індентування пірамідою Віккерса при навантаженні на індентор 30 кг визначено тріщиностійкість РСВН композитів VL групи з об'ємною долею cBN в структурі 45, 50 та 65 % і VH групи з об'ємною долею cBN в структурі 83 та 86 %. Визначені (розраховані) значення модуля Юнга для досліджуваних РСВН композитів. Показано, що в композитах VL групи при індентуванні утворюються медіанні тріщини, а в композитах VH групи тріщини Палмквіста. Визначено граничні значення тріщиностійкості для РСВН композитів VL групи в залежності від їх твердості та модуля пружності. Для всіх вимірювань проводилась статистична обробка даних з визначенням довірчих інтервалів при довірчій ймовірності 70 %.

Ключові слова: РСВН композити, тріщиностійкість, піраміда Віккерса, індентування, тріщини Палмквіста, медіанні тріщини

Надтверді композити кубічного нітриду бору за основним призначенням є матеріалами для лезового інструменту (різальні пластини класу РСВН). Основні вимоги до характеристик РСВН композитів – структура (фазовий склад, дисперсність компонентів), фізико-механічні і технологічні властивості (твердість, в'язкість руйнування, зносостійкість). Висока в'язкість руйнування (тріщиностійкість) РСВН композитів необхідна при їх застосуванні на операціях чорнової обробки загартованих сталей, а також на операціях точіння з ударом.

Тріщиностійкість керамічних матеріалів, до яких належать і РСВН композити, тривалий час оцінювали методами, призначеними для випробувань металів. Не всі вони годяться для оцінки властивостей керамік і не завжди їх можна застосувати в умовах звичайних лабораторій. Тому для оцінки тріщиностійкості керамік застосовують більш прості методи, наприклад, метод *IF* [1], заснований на аналізі тріщин, що утворились при вдавлюванні індентора в поліровану поверхню зразка.

При індентуванні пірамідою Віккерса можуть утворюватися різні види тріщин. Це залежить як від матеріалу, що випробовується, так і від умов індентування. Найчастіше це медіанні тріщини, або тріщини Палмквіста, вид яких приведено на рис. 1.

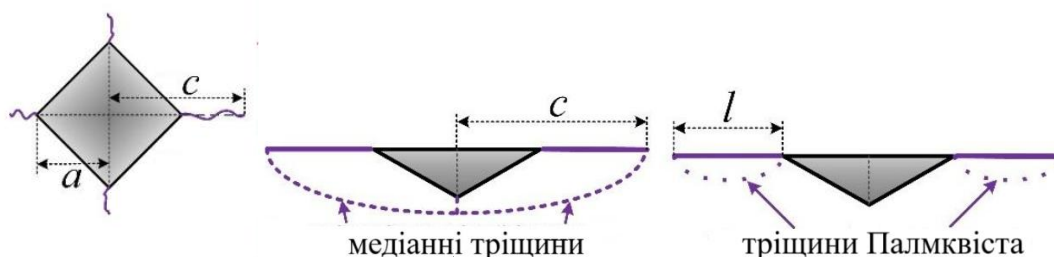


Рис. 1. Зображення форми відбитку, що утворюється після індентування полірованої поверхні матеріалу пірамідою Віккерса і вид тріщин (медіанна, або Палмквіста), що можуть утворюватися при випробуванні

При порівнянні результатів визначень K_{IC} методом ІФ і іншими методами, неодноразово звертали увагу на їх розбіжність [2 - 5]. Для підвищення точності результатів, отриманих методом ІФ був виведений ряд формул, але вони не завжди були ефективними. В табл. 1 наведені формули, що використовуються дослідниками при визначенні тріщиностійкості методом ІФ у випадку формування тріщин Палмквіста, або медіанних тріщин при ідентуванні пірамідою Віккерса.

Таблиця 1. Формули, що використовуються дослідниками при визначенні тріщиностійкості методом ІФ у випадку формування тріщин Палмквіста, або медіанних тріщин при ідентуванні пірамідою Віккерса

№	Для медіанних тріщин	Для тріщин Палмквіста
1	$K_{1c} = 0,0154 \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot F c^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,015 \cdot (l/a)^{-0,5} \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (F/c^{1,5})$
2	$K_{1c} = 0,016 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot F c^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,073 \cdot H_V \cdot a^{0,5} \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot (c/a)^{-1,56}$
3	$K_{1c} = 0,018 \cdot (E/H_V)^{0,5} \cdot F \cdot c^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,0178 \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \frac{F}{d} \cdot \left(c - \frac{d}{2}\right)^{-1/2}$
4	$K_{1c} = 0,028 \cdot H a^{0,5} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{0,5} \cdot (c/a)^{-0,5}$	$K_{1c} = 0,018 \cdot H_V \cdot d \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot (4c - 2d)^{-1/2}$
5	$K_{1c} = 0,01 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot F c^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,012 \cdot H_V \left(\frac{d}{2}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{3E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{2c - d}{d}\right)^{-1/2}$
6	$K_{1c} = 0,01675 \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot F \cdot (2c)^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,012 \cdot H_V \left(\frac{3E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot a \cdot l^{0,5}$
7	$K_{1c} = 0,067 \cdot \left(\frac{E}{H_V}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot H \cdot a^{0,5} \cdot (c/a)^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,0089 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \frac{P}{a \cdot l^{0,5}}$
8	$K_{1c} = 0,203 \cdot H \cdot a^{0,5} \cdot (c/a)^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,0889 \cdot \left(\frac{HF}{4l}\right)^{0,5}$
9	$K_{1c} = 0,16 \cdot H \cdot a^{0,5} \cdot (c/a)^{-3/2}$	$K_{1c} = 0,203 a^2 H_V (c)^{-1,5}$
10	$K_{1c} = 0,0508 \cdot F \cdot (2c)^{-3/2}$	
11	$K_{1c} = 0,04 \cdot F \cdot (2c)^{-3/2}$	

Пояснення до табл. 1: E – модуль Юнга матеріалу, що випробовується; H , H_V – твердість за Віккерсом матеріалу, що випробовується; d – довжина, a – пів довжини діагоналі відбитку після ідентування; c – довжина медіанної тріщини; l – довжина тріщини Палмквіста, F – навантаження на піраміду Віккерса при ідентуванні.

Важливим для вибору моделі розрахунку є співвідношення c/a в одержаному відбитку. Якщо $c/a > 2,3$ (медіанні тріщини), то розрахунок проводять за однією з формул, приведених в лівій колонці табл. 1, якщо ж $c/a \leq 2,3$ (тріщини Палмквіста), то за однією з формул правої колонки.

В приведених в табл. 1 формулах значення числових коефіцієнтів і показників ступеня для змінних часто відрізняються і для кожної групи матеріалів вибирають найадекватніші, випробувані формули розрахунку. Це зв'язано з особливостями міжатомних зв'язків в

досліджуваних структурах. В кераміках це ковалентний, іонний, ковалентно-металічний, іонно-металічний. Ієрархія пружності міжатомних зав'язків по спаданню: ковалентний; металічний; іонний; водневий; молекулярний.

Для розрахунків значень K_{IC} необхідні величини модулів пружності кераміки, визначення яких далеко не завжди просте завдання. Деякі формули занадто спрощені, 8-11 з лівої і 8, 9 з правої колонок, там модуль Юнга – складова числового коефіцієнту.

Що не так з вимірюванням тріщиностійкості керамік? На даний час для керамік немає достатньо ясної з точки зору фізики методики вимірювань, рівень точності залежить від якості досліджуваної поверхні, немає задовільної фізичної інтерпретації результатів вимірювань. Тому, на відміну від випадку металевих матеріалів, результати дослідження тріщиностійкості кераміки поки ще мало застосовуються при конструкторських розрахунках опору виробів поширенню в них небезпечних тріщин, а лише використовуються з метою порівняльної чисельної оцінки її опору руйнуванню.

У пропонованій роботі наведено результати дослідження тріщиностійкості PCBN композитів, одержаних реакційним спіканням порошків систем cBN–Al (BN90), cBN–TiN–Al (BN65), cBN–TiC–Al (BN50), cBN–TiCN–Al (BN45) та cBN–WRe–Al (BN70) на твердосплавній підкладці в кубічному апараті високого тиску великого об'єму (600 см³) при температурі 1800 К і тиску 5,5 ГПа.

При виборі формули для розрахунків було використано співвідношення Еванса і Чарльза [1] для тріщиностійкості K_{IC} і твердості за Віккерсом H

$$\frac{K_{IC}}{H\sqrt{a}} \cdot \left(\frac{H}{E}\right)^{\frac{1}{2}} = 0,032 \left(\frac{c}{a}\right)^{-\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

де E -модуль Юнга, H – твердість, a – половина діагоналі відбитка, c – довжина тріщини. Звідси формула для визначення тріщиностійкості методом індентування з використанням піраміди Віккерса

$$K_{IC} = 0,015 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot Fc^{-\frac{3}{2}} \quad (2)$$

де F -навантаження на індентор (в ньютонях), c – довжина тріщини (в метрах).

Для розрахунків K_{IC} використовували відбитки індентора з прямими радіальними тріщинами, які були продовженням його діагоналей.

Міжнародний стандарт *JIS R1607* визначає умови визначення тріщиностійкості матеріалу методом індентування алмазною пірамідою Віккерса з використанням формули (2). Наведена формула застосовується за умови, якщо $c/a > 2.3$, (a – половина довжини діагоналі відбитка індентора), тобто коли виконується умова формування поблизу відбитків піраміди Віккерса медіанних тріщин. В табл. 1 формули 1 – 3 для медіанних тріщин майже не відрізняються від (2), незначна відмінність в числових коефіцієнтах (0,0154; 0,016; 0,018), в (2) – 0,015. Числовий коефіцієнт 0,015 нами використовувався при дослідженні тріщиностійкості PCBN композитів [6, 7].

В формулі (2) 4 незалежні величини: E – модуль Юнга; F – навантаження на індентор; H – твердість; c – довжина тріщини. Три з них (F , H , c) визначаються в експерименті по вимірюванні тріщиностійкості. Значення модуля пружності для досліджуваних композитів розраховували з використанням даних фазового складу композиту і модуля Юнга кожної з фаз.

Модуль пружності (Юнга) для композиційних матеріалів можна визначати експериментально по швидкості поширення пружної хвилі в композиті. Також існують методи розрахунку модуля пружності. Один з підходів полягає в тому, що оцінки пружних сталей

композитів виходять з припущень про сталість деформацій в структурі композиту або про сталість напружень. Це методи Фойгта і Рейсса відповідно. Перший метод дає верхню межу значень, другий – нижню. Проведені нами раніше розрахунки для PCBN композитів систем з алюмінієм [8] показали, що спрощений розрахунок модуля Юнга за правилом суміші (модуль Юнга композиту як середньгеометричне значення модулів Юнга фаз композиту з урахуванням їх об'ємного вмісту) близький до значень, отриманих при ультразвукових дослідженнях і знаходиться в межах вилки Фойгта-Рейсса, тобто для досліджуваних композитів значення E_g^* коректні. Тому для дослідження тріщиностійкості PCBN композитів користувалися формулою (3), де c_i і E_i - об'ємна концентрація і модуль Юнга окремих фаз композиту, E_g – модуль Юнга композиту.

$$E_g^* = \prod_i E_i^{c_i} \quad (3)$$

В табл. 2 наведено дані про фазовий склад і модулі Юнга окремих фаз досліджуваних PCBN композитів, а також розрахований за формулою (3) модуль Юнга композитів. Фазовий склад композитів визначали методами рентгеноструктурного аналізу з уточненнями при розрахунку балансу мас при хімічній взаємодії між складовими шихти при реакційному спіканні за високого тиску.

Таблиця 2. Модуль Юнга PCBN композитів, розрахований за правилом суміші

Матеріал	Сполука								E_g , ГПа	
		cBN	TiC	TiN	TiCN	AlN	TiB ₂	AlB ₂		
	E_i , ГПа	800	460	440	450	350	560	215		
BN45	c_i , %	45,2			38,2	11,7	4,9		573	
BN50	c_i , %	50,0	34,0			11,8	4,2		592	
BN65	c_i , %	65,0		19,7		10,9	4,4		640	
BN90	c_i , %	82,7				10,5		6,8	681	
		Сполука								
Матеріал		cBN	WB	W ₂ B	ReB ₃	AlN	W	Re	E_g , ГПа	
	E_i , ГПа	800	750	780	560	350	400	400		
BN70	c_i , %	85,6	0,7	1,2	1,2	10,0	1	0,3	721	

При розрахунку тріщиностійкості PCBN композитів за формулою (2) використовувати значення модулів Юнга, наведених в табл. 2.

Важливою умовою міжнародного стандарту JIS R1607 є межа відношення довжини тріщини до діагоналі відбитка твердості ($c/a > 2,3$, або $c/d > 1,15$). У наших дослідах ця умова не завжди дотримується. Значення тріщиностійкості, отримані при порушенні величини співвідношення $c/d > 1,15$ вважаються некоректними.

Нижче наводяться приклади вимірювання тріщиностійкості досліджуваних PCBN композитів і граничні значення тріщиностійкості, які можливі для даних композитів при використанні для її визначення міжнародного стандарту JIS R1607.

В табл. 3 наведено дані щодо визначення тріщиностійкості PCBN композиту BN45, в складі якого 45 % cBN за об'ємом, склад зв'язки – TiCN, AlN, TiB₂ (див. табл. 2), розмір зерен cBN в композиті 0,5 – 1 мкм. В табл. 3 також приведені дані статистичної обробки результатів вимірювання (середнє значення, довірчий інтервал з довірчою ймовірністю 70%). Враховуючи довірчу ймовірність 70 %, коректний запис результату визначення тріщиностійкості композиту BN45 матиме вигляд: $K_{IC} = 7,4 \pm 0,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$.

Таблиця 3. Тріщиностійкість PCBN композитів BN45

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг					
	<i>HV30</i> , ГПа	<i>d</i> , мкм	<i>c</i> , мкм	K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	<i>c/d</i>
1	36,7	121,9	193,3	6,47	1,59
2	37,5	120,6	184,8	6,84	1,53
3	35,36	124,2	171,4	7,89	1,38
4	36,5	122,2	177,6	7,36	1,45
5	36,69	121,9	160,2	8,57	1,31
Середнє значення				7,43	
Стандартне відхилення				0,84	
Довірчий інтервал				0,39	

Міжнародний стандарт *JIS R1607* визначення тріщиностійкості індентуванням пірамідою Віккерса не застосовується для композитів, в яких відношення довжини тріщини до діагоналі відбитка твердості (*c/d*) менше 1,15. З цього випливає, що максимальна тріщиностійкість, виміряна даним методом для PCBN композитів BN45 твердістю *HV30* = 37 ГПа (див. табл. 3) не може перевищувати 10,5 МПа·м^{0,5}. В табл. 4 наведені значення граничної (максимальної) тріщиностійкості для композитів твердістю *HV30* від 30 до 50 ГПа.

Таблиця 4. Гранична тріщиностійкість для PCBN композитів BN45 різної твердості

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг					
	<i>HV30</i> , ГПа	<i>d</i> , мкм	<i>c</i> , мкм	K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	<i>c/d</i>
1	30	134,8	155,4	9,92	1,15
2	35	124,8	143,4	10,36	1,15
2а	37	121,4	139,7	10,48	1,15
3	40	116,7	134,4	10,69	1,15
4	45	110,1	126,0	11,09	1,15
5	50	104,4	120,2	11,30	1,15

В табл. 5 наведено дані щодо визначення тріщиностійкості PCBN композиту BN50, в складі якого 50 % cBN за об'ємом, склад зв'язки – TiC, AlN, TiB₂ (див. табл. 2), розмір зерен cBN в композиті 1 – 2 мкм. Враховуючи довірчу ймовірність 70 %, коректний запис результату визначення тріщиностійкості композиту BN50 матиме вигляд: $K_{IC} = 7,2 \pm 0,3$ МПа·м^{0,5}.

Таблиця 5. Тріщиностійкість PCBN композитів BN50

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг					
	<i>HV30</i> , ГПа	<i>d</i> , мкм	<i>c</i> , мкм	K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	<i>c/d</i>
1	37,31	120,9	178,9	7,98	1,48
2	36,7	121,9	189,2	7,40	1,55
3	37,09	121,2	206,4	6,46	1,70
4	37,71	120,2	193,6	7,05	1,61
5	37,31	120,9	191,2	7,23	1,58
Середнє значення				7,22	
Стандартне відхилення				0,55	
Довірчий інтервал				0,26	

Максимальна тріщиностійкість, визначена за міжнародним стандартом JIS R1607 для PCBN композитів BN50 твердістю $HV30 = 37$ ГПа (див. табл. 5) не може перевищувати $10,7 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$. Це впливає з табл. 6, де наведені значення граничної (максимальної) тріщиностійкості для PCBN композитів BN50 твердістю $HV30$ від 30 до 50 ГПа.

Таблиця 6. Гранична тріщиностійкість для PCBN композитів BN50 різної твердості

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг					
	$HV30$, ГПа	d , мкм	c , мкм	K_{IC} , МПа \cdot м ^{0,5}	c/d
1	30	134,8	155,4	10,10	1,15
2	35	124,8	143,4	10,54	1,15
2а	37	121,4	139,7	10,67	1,15
3	40	116,7	134,4	10,87	1,15
4	45	110,1	126,0	11,29	1,15
5	50	104,4	120,2	11,49	1,15

В табл. 7 наведено дані щодо визначення тріщиностійкості PCBN композиту BN65, в складі якого 65 % cBN за об'ємом, склад зв'язки – TiN, AlN, TiB₂ (див. табл. 2), розмір зерен cBN в композиті 2 – 3 мкм. Враховуючи довірчу ймовірність 70 %, коректний запис результату визначення тріщиностійкості композиту BN45 матиме вигляд: $K_{IC} = 10 \pm 1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$.

Таблиця 7. Тріщиностійкість PCBN композитів BN65

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг					
	$HV30$, ГПа	d , мкм	c , мкм	K_{IC} , МПа \cdot м ^{0,5}	c/d
1	39,49	117,5	175,5	7,64	1,49
2	36,89	121,6	141,8	10,88	1,17
3	41,74	114,3	139,1	10,52	1,22
4	32,37	129,8	152,2	10,44	1,17
5	38,92	118,3	157,7	9,03	1,33
Середнє значення				9,70	
Стандартне відхилення				1,78	
Довірчий інтервал				1,06	

Максимальна тріщиностійкість, визначена за міжнародним стандартом JIS R1607 для PCBN композитів BN65 твердістю $HV30 = 38$ ГПа (див. табл. 7) не може перевищувати $11,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$. Це впливає з табл. 8, де наведені значення граничної (максимальної) тріщиностійкості для PCBN композитів BN65 твердістю $HV30$ від 30 до 50 ГПа.

Таблиця 8. Гранична тріщиностійкість для PCBN композитів BN65 різної твердості

	$HV30$, ГПа	d , мкм	c , мкм	K_{IC} , МПа \cdot м ^{0,5}	c/d
1	30	134,8	155,4	10,51	1,15
2	35	124,8	143,4	10,98	1,15
2а	38	119,8	137,9	11,18	1,15
3	40	116,7	133,9	11,39	1,15
4	45	110,1	126,0	11,75	1,15
5	50	104,4	120,2	11,97	1,15

Матеріали BN45, BN50, BN65 відносяться до PCBN композитів BL групи, де невисокий вміст cBN, а основа зв'язки – тугоплавкі сполуки титану (TiC, TiN TiCN), в яких ковалентно-металічний тип міжатомних зв'язків. При індентуванні таких сполук пірамідом Віккерса утворюються медіанні тріщини, тому для визначення тріщиностійкості таких композитів застосовується стандарт JIS R1607. На рис. 2 приведені фотографії відбитків, одержаних при визначенні тріщиностійкості композитів BN45 (рис. 2 а, б), BN50 (рис. 2 в, г), BN65 (рис. 2 д, е). Тріщини видно чітко, вони є продовженням діагоналей відбитка.

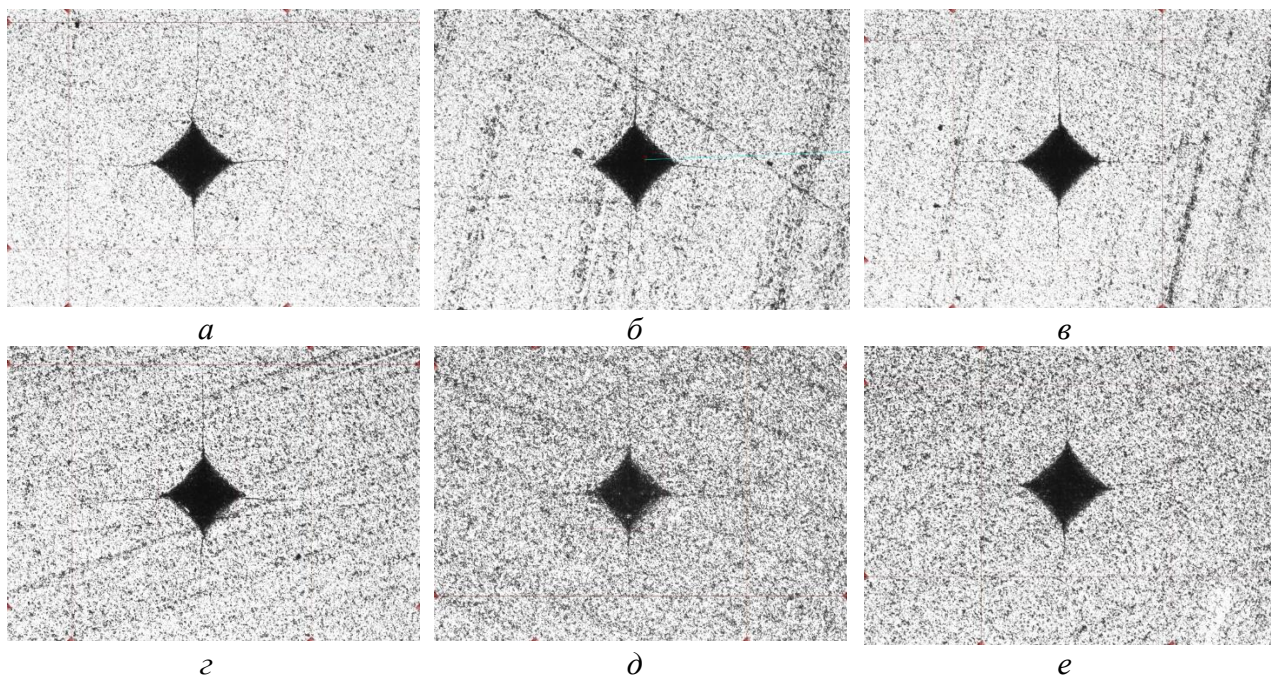


Рис. 2. Фотографії відбитків, одержаних при визначенні тріщиностійкості композитів BN45 (а, б), BN50 (в, г), BN65 (д, е).

Матеріали BN90 і BN70 відносяться до PCBN композитів BH групи, де вміст cBN перевищує 75 % за об'ємом і утворює міцний каркас. Вміст cBN в BN90 – 83 %, а в BN70 – 86 % за об'ємом, основа зв'язки в обох композитах нітрид алюмінію (див. табл. 2). В сполуках cBN і AlN міжатомні зв'язки ковалентно-іонні, доля іонності в cBN до 15 %, в AlN до 40 %. При індентуванні таких сполук пірамідом Віккерса відношення c/d як правило менше, ніж допускає стандарт JIS R1607 ($c/d < 1,15$). В [7] наголошувалось, що при індентуванні пірамідом Віккерса PCBN композитів системи cBN-Al утворюються тріщини Палмквіста. В табл. 1 приведені найбільш поширені формули для визначення тріщиностійкості таких композитів. Для визначення тріщиностійкості композитів BN90 і BN70 нами були вибрані наступні формули:

$$K_{1C} = 0,073 \cdot H_V \cdot a^{0,5} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{5}} (c/a)^{-1,56} \quad (3)$$

$$K_{1C} = 0,0889 \cdot \left(\frac{HF}{4l}\right)^{0,5} \quad (4)$$

В табл. 9 наведено дані щодо визначення тріщиностійкості PCBN композиту BN90, в складі якого 83 % cBN за об'ємом, склад зв'язки – AlN, AlB₂ (див. табл. 2), розмір зерен cBN в композиті 10–14 мкм. Маємо два значення для тріщиностійкості композиту: одержане при розрахунку за формулою (3) – $K_{1C} = 10,6 \pm 0,5$ МПа·м^{0,5}; за формулою (4) – $K_{1C} = 12,3 \pm 0,5$

МПа·м^{0,5}. Важко сказати, яке з них краще відповідає реальній в'язкості руйнування композиту. Можна взяти середнє значення з двох результатів. Тоді тріщиностійкість PCBN композиту BN90 буде: $K_{IC} = 11,4 \pm 0,4$ МПа·м^{0,5}.

Таблиця 9. Тріщиностійкість PCBN композитів BN90

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг							
№ дослід у	HV30, ГПа	d, мкм	c, мкм	c/d	l, мкм	K _{IC} , МПа·м ^{0,5}	
						формула (3)	формула (4)
1	51,87	102,5	75,9	0,74	24,65	9,32	11,1
2	51,77	102,6	72,8	0,71	21,5	10,16	11,8
3	51,76	102,6	69,6	0,68	18,3	11,15	12,8
4	54,2	100,3	72,2	0,72	22,05	10,26	11,9
5	47,08	107,6	68,1	0,63	14,3	11,87	13,8
Середнє значення						10,55	12,30
Стандартне відхилення						0,98	1,06
Довірчий інтервал						0,45	0,49

В табл. 10 наведено дані щодо визначення тріщиностійкості PCBN композиту BN70, в складі якого 86 % cBN за об'ємом, склад зв'язки – AlN (10 %) W (1 %) і високомодульні бориди WB, W₂B ReB₃ (див. табл. 2), розмір зерен cBN в композиті 5–7 мкм. Маємо два значення для тріщиностійкості композиту: одержане при розрахунку за формулою (3) – $K_{IC} = 9,0 \pm 0,4$ МПа·м^{0,5}; за формулою (4) – $K_{IC} = 10,6 \pm 0,3$ МПа·м^{0,5}. Середнє значення з двох результатів для PCBN композиту BN70 становить: $K_{IC} = 9,8 \pm 0,4$ МПа·м^{0,5}.

Таблиця 10. Тріщиностійкість PCBN композитів BN70

Твердість, тріщиностійкість, Віккерс, 30 кг							
№ дослід у	HV30, ГПа	d, мкм	c, мкм	c/d	l, мкм	K _{IC} , МПа·м ^{0,5}	
						формула (3)	формула (4)
1	54,46	100	84,6	0,85	34,6	7,56	9,6
2	46,79	107,9	79,6	0,74	25,65	8,81	10,3
3	47,09	107,6	76,1	0,71	22,3	9,66	11,1
4	49,36	105,1	74,6	0,71	22,05	9,98	11,4
5	47,09	107,6	78,1	0,73	24,3	9,16	10,6
Середнє значення						9,03	10,59
Стандартне відхилення						0,94	0,71
Довірчий інтервал						0,44	0,33

На рис. 3 приведені фотографії відбитків, одержаних при визначенні тріщиностійкості PCBN композитів ВН групи BN90 (рис. 3 а, б) і BN70 (рис. 3 в, г). Тріщини є продовженням діагоналей відбитка. Порівняння з аналогічними тріщинами в PCBN композитах ВЛ групи (див. рис. 2) показує, що тріщини в PCBN композитах ВН групи поступаються довжиною, чіткістю розпізнавання і точністю вимірювання.

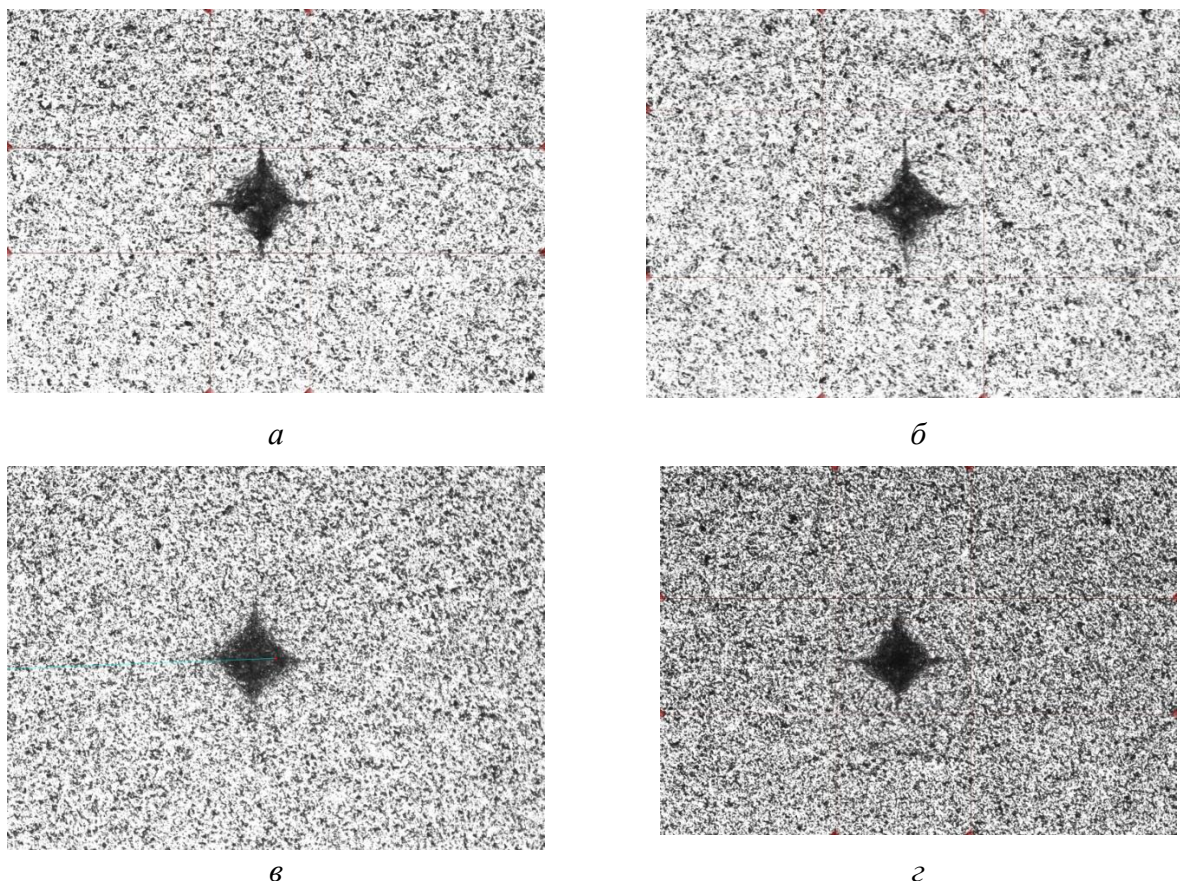


Рис. 3. Фотографії відбитків, одержаних при визначенні тріщиностійкості композитів BN90 (а, б) та BN70 (в, г)

В табл. 11 наведені значення тріщиностійкості для PCBN композитів BL і BH груп з урахуванням виду тріщин, які в них утворюються при індуванні пірамідою Віккерса і способів розрахунку, залежного від виду тріщин. Для композитів BL групи, де утворюються медіанні тріщини, виконувались вимоги міжнародного стандарту JIS R1607. Всі розрахунки проводились з використанням уточнених значень модуля Юнга досліджуваних композитів.

Таблиця 11. Тріщиностійкість PCBN композитів BL і BH груп, визначена методом індування пірамідою Віккерса

Матеріал	BL група, медіанні тріщини			BH група, тріщини Палквімста	
	BN45	BN50	BN65	BN70	BN90
K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	7,4±0,4	7,2±0,3	10±1	9,8±0,4	11,4±0,4

Висновки

1. Проведено вимірювання тріщиностійкості методом індування пірамідою Віккерса PCBN композитів BL і BH груп. Отримані наступні значення: для композитів BL групи з об'ємною долею cBN в структурі 45, 50 і 65 % тріщиностійкість 7,4±0,4, 7,2±0,3 та 10±1 МПа·м^{0,5} відповідно; для композитів BH групи з об'ємною долею cBN в структурі 86 та 83 % тріщиностійкість 9,8±0,4 та 11,4±0,4 МПа·м^{0,5} відповідно. Для всіх вимірювань проводилась статистична обробка даних з визначенням довірчих інтервалів при довірчій ймовірності 70 %.

2. Для PCBN композитів BL групи BN45, BN50 та BN65 дотримуються умови

міжнародного стандарту JIS R160 для вимірювання тріщиностійкості методом індентування пірамідою Віккерса. При індентуванні утворювались прямі радіальні тріщини, які були продовженням діагоналей відбитка. Довжина тріщин дозволяла застосовувати співвідношення Еванса і Чарльза для визначення тріщиностійкості K_{IC} .

3. Для композитів BN90 і BN70 умови міжнародного стандарту JIS R160 в більшості випадків не дотримуються, замість медіанних тріщин при індентуванні утворюються тріщини Палмквіста. Для визначення тріщиностійкості таких композитів використовували відомі емпіричні залежності, що застосовуються для розрахунків тріщиностійкості для випадку тріщин Палмквіста.

4. Визначені (розраховані) значення модуля Юнга для досліджуваних PCBN композитів. Їх значення наступні: BN45 – 570 ГПа; , BN50 – 590 ГПа; BN65 – 640 ГПа; BN90 – 680 ГПа; BN70 – 720 ГПа.

5. Визначено граничні значення тріщиностійкості для PCBN композитів BL групи в залежності від їх твердості та модуля пружності. Методика вимірювання тріщиностійкості за міжнародним стандартом JIS R160 має обмеження, вона застосовується тільки у випадку утворення медіанних тріщин, при цьому відношення довжини тріщини до довжини діагоналі відбитка повинно бути більшим 1,15. Це накладає обмеження на величину тріщиностійкості, що може бути визначена даним методом. Для досліджуваних PCBN композитів максимально можливе значення тріщиностійкості, визначене коректно даним методом, наступні: BN45 – $11,3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$; BN50 – $11,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$; BN65 – $12 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$. Такі обмеження не стосуються PCBN композитів BH групи.

Mykola BEZHENAR, Andrii PATSYK, Oleksandr SOKOLOV, Yaroslav ROMANENKO

V.Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine,

CRACK RESISTANCE OF PCBN COMPOSITES DETERMINED BY THE VICKERS PYRAMID INDENTATION METHOD

The crack resistance of PCBN composites of the BL group with a volume fraction of cBN in the structure of 45, 50, and 65% and the BH group with a volume fraction of cBN in the structure of 83 and 86 % was determined by the Vickers pyramid indentation method with a load of 30 kg on the indenter. The Young's modulus values for the studied PCBN composites were determined (calculated). It was shown that median cracks form in the BL group composites during indentation, and Palmqvist cracks form in the BL group composites. The limit values of crack resistance for PCBN composites of the BL group were determined depending on their hardness and elastic modulus. For all measurements, statistical data processing was performed with the determination of confidence intervals at a confidence probability of 70%.

Key words: *PCBN composites, crack resistance, Vickers pyramid, indentation, Palmqvist cracks, median cracks*

Література

1. Evans A.G., Charles E.A. Fracture toughness determination by indentation // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1976. Vol. 59, N 7-8. P. 371–372.
2. Гогоци Г.А. Сопротивление керамики разрушению: базовая диаграмма и R-линия. Проблемы прочности. 2006. № 3. С. 60–74.
3. Li Z., Ghosh A., Kobayash A., Bradt R. Indentation fracture toughness of sintered silicon carbide in the Palmqvist crack regime . *J. Amer. Ceram. Soc.* 1989 Vol. 72, N 6. P. 904 – 911.
4. Мильман Ю.В. Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором. *Современное материаловедение XXI век: сб. науч. трудов ИПМ. К.: Наук. думка, 1998. С. 637–655.*
5. Гогоци Г. А . Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов.

- Порошк. металлургия*. 2004. № 7/8. С. 54 - 67.
6. Беженар М.П., Коновал С. М., Божко С.А., Лошак М. Г., Александрова Л. І., Заїка М.І., Нагорний П.А., Білявина Н.М. Фізико-механічні властивості композитів сBN, отриманих реакційним спіканням при високому тиску порошків кубічного нітриду бору з алюмінієм. *Сверхтвердые материалы*. 2010. № 1. С. 3–18.
 7. Беженар М. П., Лошак М. Г., Шульженко О. О., Коновал С. М., Александрова Л. І., Божко С. А., Нагорний П.А., Білявина Н. М. Фізико-механічні властивості композитів системи сBN-Al залежно від густини, фазового складу і структури. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*: сб. науч. тр. 11. К: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. С. 164–171.
 8. Гарбуз Т.А., Беженар Н.П., Божко С.А., Лошак М.Г., Александрова Л.И. (2010) Композиты сBN, упрочненные высокомолекулярными боридами // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*: сб. науч. тр. Вып. 13. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. С. 332–337.

Надійшла 27.11.25

Reference

1. Evans, A.G. & Charles, E.A (1976). Fracture toughness determination by indentation. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 59(7-8), 371–372.
2. Hohotsy, N. A. (2006). Soprotivlenie keramiki razrusheniui: bazovaia diahramma I L-liniia [Ceramic resistance to destruction: basic diagram and R-line]. *Problemy prochnosti – Strength Problems*, 93, 60–74 [in Russian]
3. Li, Z., Ghosh, A., Kobayash, A., & Bradt, R. (1989). Indentation fracture toughness of sintered silicon carbide in the Palmqvist crack regime. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 72(6), 904–911.
4. Milman, Yu. V. (1998). Novye metodiki mikromekhanicheskikh ispytaniy materialov metodom lokalnoho nahruzheniia zhestkim indentorom [New methods for micromechanical testing of materials using local loading with a rigid indenter]. *Sovremennoe materialovedenie XXI vek – Modern Materials Science in the 21st Century*. (p. 637–655). Naukova dumka [in Russian].
5. Hohotsy, A. (2006). Treshchinostoikost sovremennoi keramiki i keramicheskikh kompozitov [Crack resistance of modern ceramics and ceramic composites]. *Poroshkovaia metalurhiia – Powder metallurgy*, (7/8), 54–67. [in Russian]
6. Bezhenar, M.P., Konoval, S.M., Bozhko, S.A., et al. (2010). Fyzyko-mekhanichni vlastyvoli kompozytiv cBN, otrymanykh pry vysokomu tysku poroshkiv kubichnoho nitydu boru z aliuminiem [Physical and mechanical properties of sBN composites obtained by reaction sintering at high pressure of cubic boron nitride powders with aluminum]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, (1), 3–18. [in Ukrainian]
7. Bezhenar, M.P. Loshak, M.H. Shulzhenko, et al. (2008). Fyzyko-mekhanichni vlastyvoli kompozytiv systemy cBN–Al zalezno vid hustyny, fazovoho skladu I struktury [Physical and mechanical properties of cBN-Al composites depending on density, phase composition, and structure]. *Porodorazrushaiushchii I metaloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika I tekhnolohiia eho izhotovleniia I primeneniia – Rock-breaking and metalworking tools – techniques and technology for their manufacture and use* (11nd Issue, p. 164–171). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
8. Harbuz T. A., Bezhenar M.P. Loshak M.H, et al. (2010). Kompozity cBN uprochnennye

vysokomodulnymi boridami. *Porodorazrushaiushchii I metaloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika I tekhnologiya eho izhotovleniia I primeneniia* – Rock-breaking and metalworking tools – techniques and technology for their manufacture and use. (13nd Issue, p. 332–337) [in Russian].