

В. І. Кушч*, А. С. Манохін, С. А. Клименко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м Київ, Україна

*vkushch56@gmail.com

Теоретична оцінка крихкої міцності двофазної кераміки cBN–TiN

Викладено теоретичну методичку оцінки крихкої міцності багатофазних полікристалічних матеріалів і наведено результати її застосування до двофазної кераміки cBN–TiN.

Ключові слова: багатофазна кераміка, крихка міцність, мікро-механічна модель, статистична теорія Вейбула.

Фізико-механічні і функціональні властивості структурно-неоднорідних матеріалів (зокрема керамік) є структурно-чутливими параметрами, тобто залежать не тільки від об'ємного вмісту і властивостей фаз, але й від геометрії мікроструктури, наприклад, [1]. Особливо чутливою до структури є крихка міцність, яка визначається переважно зумовленими неоднорідністю матеріалу та дефектами (порами, тріщинами) локальними концентраціями напружень. Саме вони спричиняють зародження та розвиток спочатку мікропошкоджень, а потім і макроруйнування зразка. Кераміці органічно притаманна варіативність структури і властивостей як на мікро-, так і на макрорівні, тому надійна теорія крихкої міцності повинна поєднувати адекватну модель мікроструктури, вичерпний аналіз її напруженого стану та статистичний аналіз даних комп'ютерного моделювання. Практично безальтернативним вибором для теоретичної оцінки міцності крихких тіл є статистична теорія Вейбула (див., наприклад, ґрунтовний огляд по міцності керамік [2]). Водночас, є лише окремі публікації, де теорію Вейбула застосовано до оцінки крихкої міцності структурно-неоднорідних тіл [3–6].

Адекватна модель структурно-неоднорідного матеріалу має враховувати статистичні параметри мікроструктури і не потребувати надзусиль для аналізу модельної задачі. Компроміс полягає у використанні узагальненої періодичної моделі, яка дозволяє апроксимувати реальну мікроструктуру (рис. 1, а), тоді як відповідна мікромеханічна крайова задача є детермінованою. На рис. 1, б показано елементарну комірку періодичної структурної моделі двофазної кераміки. Вона містить певну кількість частинок, форма і розмір яких є випадковими величинами зі своїм статистичним розподілом для кожної фази. З метою спрощення викладу розглянуто двовимірну структурну модель, аналіз тривимірної моделі цілком аналогічний. Для генерації геометричних моделей із заданими статистичними параметрами структури використано розроблені авторами алгоритми і програмні засоби.

Мікромеханічна модель крихкого гетерогенного матеріалу являє собою крайову задачу теорії пружності, сформульовану на основі розглянутої вище структурної моделі. Крайова задача поєднує рівняння статичної рівноваги,

визначальні співвідношення лінійної теорії пружності, а також граничні та контактні умови на міжфазних і міжзеренних границях. З огляду на макроперіодичність структури, макроскопічно-однорідний напружений стан представницького об'єму (див. рис. 1) забезпечують квазіперіодичні кінематичні умови на його зовнішній поверхні:

$$u_i(\mathbf{x} + \mathbf{i}_j L) - \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \langle \varepsilon_{ij} \rangle L \quad (i, j = 1, 2), \quad (1)$$

де L – розмір комірки; \mathbf{i}_j – одиничні вектори декартової системи координат, $\mathbf{u} = u_i \mathbf{i}_i$ – вектор переміщень; $\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \langle u_{i,j} + u_{j,i} \rangle / 2$ – компоненти тензора макроскопічних деформацій. У подальшому розглянуто макроскопічно-однорідний напружений стан гетерогенного тіла із середніми напруженнями $\langle \sigma_{11} \rangle$ і $\langle \sigma_{22} \rangle$ у якості параметрів навантаження. З огляду на складну геометрію моделі її аналіз проведено методом скінчених елементів. Результатом чисельного розв'язання крайової задачі є поля переміщень, деформацій і напружень в об'ємі представницького об'єму. Цих даних достатньо для оцінки тензора ефективних пружних модулів, ефективних параметрів Вейбула і поверхні крихкого руйнування структурно-неоднорідного крихкого тіла.

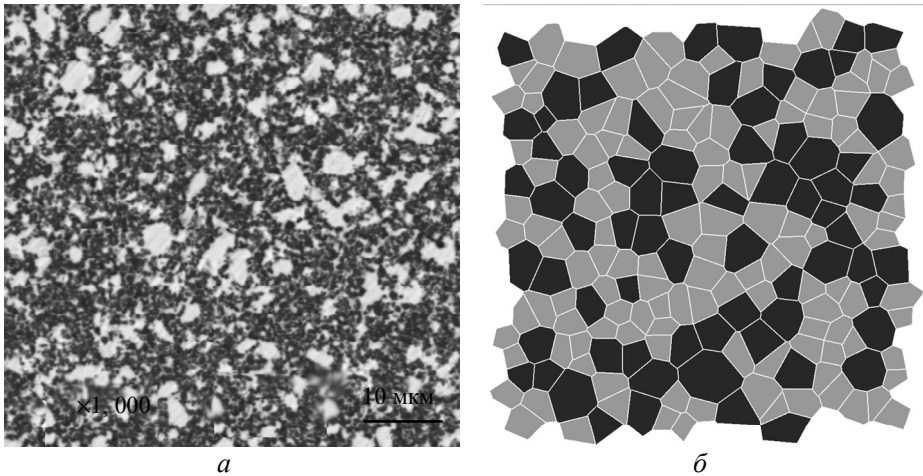


Рис. 1. Мікроструктура двофазної кераміки sBN-TiN: шліф (а) і геометрична модель (б).

Згідно зі статистичною теорією Вейбула, ймовірність руйнування P_f однорідного зразка об'ємом V з параметрами Вейбула матеріалу m і σ_0 під дією постійного тензора напружень σ визначає максимальне напруження розтягу σ_1 за формулою

$$P_f(\sigma, V) = 1 - \exp \left[- \frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (2)$$

де $\sigma = \sigma_1$ за $\sigma_1 > 0$ і $\sigma = 0$ в протилежному випадку; V_0 – нормуючий об'єм (зазвичай, об'єм досліджуваного зразка [2]). Узагальнення формули (2) на випадок двофазного матеріалу і неоднорідності пружних полів має вигляд [3, 6]

$$P_f(\sigma, V) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{V_0} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{p}{\sigma_{0i}} \right)^{m_i} V_i^* \right], \quad V_i^* = \int_{V_i} \left(\frac{\sigma}{p} \right)^{m_i} dV, \quad (3)$$

де V_i , m_i і σ_{0i} – відповідно об'єм і модулі Вейбула матеріалу i -ї фази ($i = 1, 2$); σ є функцією головних напружень [6, 7], p – параметр навантаження. В припущенні, що характерний розмір мікротріщин значно менший за розмір частинок, вказана теорія може бути застосована для оцінки крихкої міцності представницького об'єму як характеристики міцності керамічного зразка.

Наведемо деякі розрахункові дані для двофазної кераміки cBN–TiN, одержані в припущенні повного механічного контакту, тобто неперервності векторів переміщень і нормальних напружень на міжфазних і міжзеренних границях. Зокрема, визначимо, що $\sigma = \sigma_1$, $m_1 = 10$, $m_2 = 7$, $\sigma_{02} = 0,7\sigma_{01}$. В подальшому викладі всі величини з розмірністю напружень були нормовані на σ_{01} , а очевидним вибором V_0 є об'єм представницької комірки. Крива 1 на рис. 2 ілюструє прогнозовану формулою (3) ймовірність руйнування кераміки cBN–TiN з об'ємним вмістом фаз $c_1 = c_2 = 0,5$ за одновісного розтягу; криві 2 і 3 розраховано для cBN і TiN відповідно; крива 1 очікувано є ближчою до кривої 3, тобто міцність двофазної кераміки визначається переважно властивостями менш міцної фази.

Було розглянуто ефективні параметри Вейбула m^* і σ_0^* структурно-неоднорідного матеріалу як параметри апроксимації розрахункових даних формулою Вейбула для одновісного розтягу представницького об'єму:

$$P_f = 1 - \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\sigma_0^*} \right)^{m^*} \right]. \quad (4)$$

На рис. 3 показано ефективний параметр Вейбула m^* двокомпонентної кераміки cBN–TiN як функцію відношення σ_{02}/σ_{01} . Примітно, що m^* зростає зі збільшенням як σ_{02}/σ_{01} , так і об'ємного вмісту більш міцної фази.

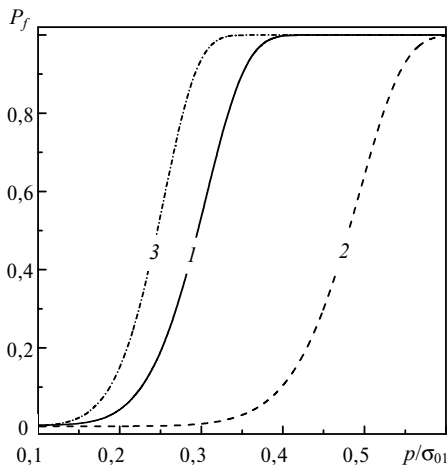


Рис. 2. Ймовірність руйнування двофазної кераміки cBN–TiN за одновісного розтягу: 1 – cBN–TiN; 2 – cBN; 3 – TiN.

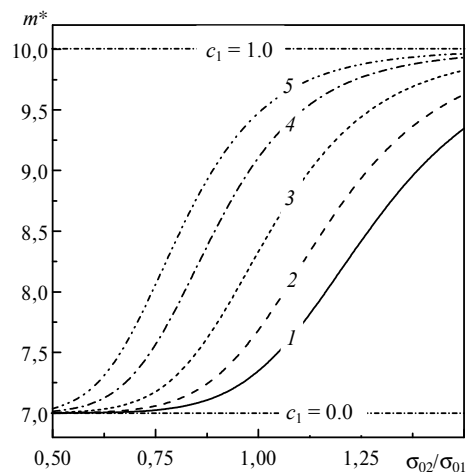


Рис. 3. Ефективний модуль Вейбула m^* кераміки cBN–TiN як функція відношення σ_{02}/σ_{01} : $c_1 = 0,1$ (1), $0,25$ (2), $0,5$ (3), $0,75$ (4), $0,9$ (5).

Результати моделювання двовісного макроскопічно-однорідного навантаження кераміки cBN–TiN свідчать про суттєву залежність межі крихкої міцності від типу навантаження. Що важливо, макроскопічна міцність двофазної системи (на відміну від однофазної) є скінченою навіть у випадку одновісного стиску внаслідок зумовлених неоднорідністю структури локальних напружень розтягу. На рис. 4 криві 1–3 показують поверхні руйнування кераміки cBN–TiN ($c_1 = c_2 = 0,5$) за двовісного навантаження з ймовірністю $P_f = 0,1, 0,5$ і $0,9$ відповідно. Розрахована крихка міцність на стиск в 7–8 разів перевищує міцність на розтяг, що узгоджується з відомими літературними даними, наприклад, [7], і є підтвердженням адекватності розвинутої моделі. З іншого боку це означає, що побудова макроскопічної теорії крихкої міцності таких матеріалів вимагає розгляду, крім ефективних модулів Вейбула, ще й відповідного представленням на рис. 4 даним макроскопічного критерію руйнування.

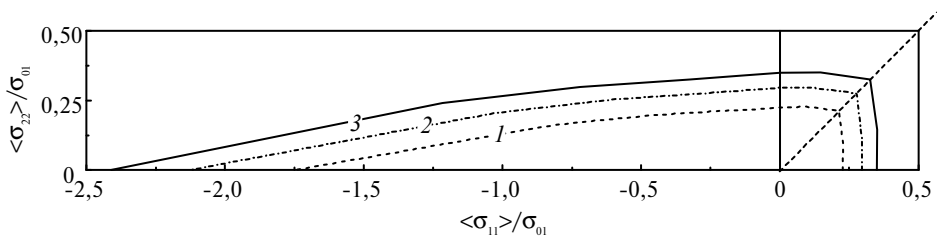


Рис. 4. Поверхні руйнування кераміки cBN–TiN з об’ємним вмістом фаз $c_1 = c_2 = 0,5$ за двовісного навантаження $P_f = 0,1$ (1), $0,5$ (2), $0,9$ (3).

ФІНАНСУВАННЯ

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту “Розбудова центру колективного користування ІНМ НАН України як науково-інструментальної бази для створення передових надтвердих композиційних матеріалів” (реєстраційний номер 2023.05/0007).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

V. I. Kushch, A. S. Manohin, S. A. Klimenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Theoretical evaluation of the brittle strength of cBN–TiN
two-phase ceramics

The theoretical methodology for assessing the brittle strength of multiphase polycrystalline materials is outlined and the results of its application to two-phase cBN–TiN ceramics are given.

Keywords: multiphase ceramics, brittle strength, micromechanical model, Weibull statistical theory.

1. Umer M.A., Sub P.H., Lee D.J., Ryu H.J., Hong S.H. Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Mater. Sci. Eng. A*. 2012. Vol. 552. P. 151–156.
2. Danzer R. On the relationship between ceramic strength and the requirements for mechanical design. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014. Vol. 34. P. 3435–3460.

3. Kushch V.I., Golovchan V.T. Application of a multiparticle model to estimate the brittle strength of a particle reinforced composite. In: *Fracture Mechanics of Ceramics (FMOC)* / eds. R.C. Bradt, D.P.H. Hasselman, D. Munz, M. Sakai, V.Y. Shevchenko. 1996. Vol. 12. P. 355–370.
4. Sutherland L.S., Guedes Soares C. Review of probabilistic models of the strength of composite materials. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 1997. Vol. 56. P. 183–196.
5. Kushch V.I., Polotnyak S.B. Structural and statistical model of a hard alloy with damages. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 3. P. 172–182.
6. Lamon J. *Brittle Fracture and Damage of Brittle Materials and Composites. Statistical-Probabilistic Approaches.* Elsevier Ltd., 2016. 282 p.
7. Matsuo Y. Statistical fracture theory for multiaxial stress states using Weibull's three-parameter function. *Eng. Fract. Mech.* 1981. Vol. 14. P. 527–538.

Надійшла до редакції 15.07.24

Після доопрацювання 15.07.24

Прийнята до опублікування 19.07.24