

УДК 621.762

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-266-272

Н. В. Литошенко, кандидат техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074 м. Київ, Україна, e-mail: lytnat@ukr.net*

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ WC–Co, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ УЛЬТРАКРУПНО-ЗЕРНИСТОГО WC З КОБАЛЬТОВИМ ПОКРИТТЯМ

Завдання наукового дослідження полягає в тому, щоб оцінити рівень міцності та пластичності за умови випробування на розтяг, згин та стиск твердого сплаву WC–Co, виготовленого з ультракрупнозернистого карбїду WC з кобальтовим покриттям. А також дослідити залежність границь міцності R_m , R_{bm} , R_{cm} та граничного значення пластичної деформації ε_p від параметрів мікроструктури композитів даного класу.

Встановлено, що границі міцності R_m , R_{bm} і R_{cm} суттєво залежать від розміру зерна WC (в діапазоні від 20 до 80 мкм) і товщини кобальтового покриття δ (від 1,11 мкм до 7,6 мкм), що відповідає об'ємному вмісту Co від 0,04 до 0,16. Збільшення середнього розміру карбїдних зерен та об'ємного вмісту кобальту в 4 рази призводить до зменшення R_{cm} на 43%, а R_m і R_{bm} – на 86%. Пластичність же суттєво зростає зі збільшенням d_{WC} і δ у випадку стискування і відсуття за умови розтягування ультракрупнозернистого матричного твердого сплаву WC–Co.

Ключові слова: *твердий сплав WC–Co, ультракрупнозернистий WC, кобальтове покриття, міцність, пластичність, структурні характеристики, аналітичний метод.*

Вступ

В Інституті надтвердих матеріалів імені В. Н. Бакуля НАН України проводяться дослідження, спрямовані на отримання за допомогою класичних та адитивних технологій нових металокерамічних композитів на основі ультракрупнозернистих (розміром 80/40 мкм) порошків карбїду WC [1]. Продемонстровано великий потенціал цих матеріалів для практичного використання. Встановлено, що застосування ультракрупнозернистого порошку WC полегшує нанесення на його частинки безперервного пластичного покриття, що істотно змінює їхню взаємодію в процесі ущільнення та спікання. Отже, відкриваються нові можливості для отримання принципово нових структур металокерамічних композитів. Досліджено вплив структурних параметрів на руйнуюче навантаження під час випробування на стиск частинок WC розміром 80/40 мкм з пластичними покриттями з кобальту, нікелю і міді. За допомогою математичного моделювання визначено залежність міцності на стиск від мікроструктурних параметрів розглянутих пористих скелетних структур [2]. Дослідження високомодульних скелетних композитів, отриманих методом просочування, представлено в [3]. Тверді сплави такого класу можуть використовуватись в важконавантажуваних вузлах пар тертя, гірничому та буровому інструменті, бандажах прокатних валків, висадочних матрицях [4].

Фізико-механічні властивості надкрупнозернистих твердих сплавів вивчені недостатньо. Їхнє ж застосування має забезпечити суттєве підвищення коефіцієнта інтенсивності напружень, ударної в'язкості та довговічності за умови циклічних навантажень [5].

Через нестабільність експериментальних результатів, отриманих під час випробування крупнозернистих твердих сплавів WC–Co на розтяг та згин, виникає необхідність розробки та застосування розрахункових алгоритмів [6]. Вдосконалення методів оцінювання механічних

властивостей досліджуваних високомодульних твердих сплавів є актуальним та має практичне значення.

Отже, метою роботи було за допомогою розрахункових алгоритмів оцінити рівень міцності та пластичності за умови випробування на стиск, розтяг та згин твердого сплаву WC-Co, виготовленого з надкрупнозернистого порошку WC, частинки якого вкриті шаром з Co. А також дослідити залежність границь міцності R_{cm} , R_m і R_{bm} , та граничного значення пластичної деформації під час стискання від параметрів мікроструктури композитів даного класу.

Метод досліджень

Для визначення міцності за умови стискання та розтягування ультракрупнозернистих компактних твердих сплавів, виготовлених із покритих кобальтом порошоків WC, використовувалися основні теоретичні методи механіки композитних матеріалів [7]. Необхідними даними для проведення розрахунків є наступні: модуль зсуву, модуль всебічного стиску, лінійний коефіцієнт теплового розширення для кобальтової зв'язки ($\mu_1=81,5\text{ГПа}$, $K_1=187,3\text{ГПа}$, $\alpha_1=13,4\cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) [8] і карбідної фази ($\mu_2=301\text{ГПа}$, $K_2=392\text{ГПа}$, $\alpha_2=5,2\cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) [9]; різниця між кімнатною температурою і температурою, за якої починають виникати залишкові термічні напруження в процесі охолодження на кінцевій стадії спікання ($T=-700\text{K}$ [10]); середній розмір частинок карбиду вольфраму ($d=(20\div 80)\mu\text{м}$); об'ємний вміст зв'язки в спеченому твердому сплаві ($x=(0,04\div 0,16)$), що визначається товщиною покриття δ карбідних зерен як $2\delta=d\cdot x/(1-x)$). В наведених нижче співвідношеннях (1–4) через y позначено січний модуль зсуву кобальтової фази, нижній індекс 1 відповідає Co, а 2 – WC.

Обчислювальний алгоритм складається з наступних етапів.

1. Визначення пружних модулів і коефіцієнту теплового розширення сплаву:

$$\begin{aligned} \mu(x, y) &= x \cdot y + (1-x)m_2 - \frac{x(1-x)(y-\mu_2)^2}{xm_2 + (1-x)y + bmc(y)}, \\ K(x, y) &= xK_1 + (1-x)K_2 - \frac{x(1-x)(K_1 - K_2)^2}{xK_2 + (1-x)K_1 + bkc(y)}, \\ bmc(y) &= y \frac{9K_1 + 8y}{6(K_1 + 2y)}, \quad bkc(y) = \frac{4}{3}y; \\ \alpha(x) &= \left(1 + \frac{4y}{3K(x, m_1)} \right) \left[\frac{xK_1\alpha_1}{K_1 + \frac{4}{3}y} + \frac{(1-x)K_2\alpha_2}{K_2 + \frac{4}{3}y} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

2. Визначення залишкових термічних напружень в кобальтовій та карбідній фазах:

$$\sigma_{\text{res.}}^{(1)}(x) = \frac{4K_1\mu_1}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_1} [\alpha(x) - \alpha_1]T, \quad \sigma_{\text{res.}}^{(2)} = -\frac{x}{1-x} \sigma_{\text{res.}}^{(1)} \quad (2)$$

3. Визначення напруженого стану кобальтової фази:

$$\sigma_{33}^{(1)}(x, y, p) = \frac{1}{3} \sigma_{\text{кк}}^{(1)}(x, y, p) \pm \frac{2}{3} p m_{12}(x, y),$$

$$\begin{aligned} \sigma_{22}^{(1)}(x, y, p) &= \frac{1}{3} \sigma_{\text{кк}}^{(1)}(x, y, p) \mp \frac{1}{3} p m_{12}(x, y), \quad \sigma_{11}^{(1)}(x, y, p) = \sigma_{22}^{(1)}(x, y, p); \\ \sigma_{\text{кк}}^{(1)}(x, y, p) &= \pm p k_{12}(x, y) + 3 \sigma_{\text{рес.}}^{(1)}(x), \quad \sigma_i^{(1)}(x, y, p) = |p| m_{12}(x, y); \\ m_{12}(x, y) &= \frac{y}{\mu(x, y)} \cdot \frac{\mu(x, y) + bmc(y)}{y + bmc(y)}, \quad k_{12}(x, y) = \frac{K_1}{K(x, y)} \cdot \frac{K(x, y) + \frac{4}{3} y}{K_1 + \frac{4}{3} y} \end{aligned} \quad (3)$$

де p – зовнішнє одновісне напруження, прикладене в напрямку осі x_3 . Знак плюс відповідає розтягу, а знак мінус – стиску.

4. Визначення пластичної деформації кобальтової фази:

$$\varepsilon_p^{(1)}(x, y, p) = \varepsilon^{(1)}(x, y, p) - \varepsilon^{(1)}(x, m_1, p),$$

де $\varepsilon^{(1)}(x, y, p) = \frac{1}{E_1(y)} [\sigma_{33}^{(1)}(x, y, p) - 2\nu_1(y)\sigma_{22}^{(1)}(x, y, p)]$ у випадку розтягу і

$\varepsilon^{(1)}(x, y, p) = \frac{1}{E_1(y)} [\sigma_{22}^{(1)}(x, y, p) - \nu_1(y)(\sigma_{33}^{(1)}(x, y, p) + \sigma_{22}^{(1)}(x, y, p))]$ у випадку стиску;

$$E_1(y) = \frac{9K_1 y}{3K_1 + y}, \quad \nu_1(y) = \frac{3K_1 - 2y}{6K_1 + 2y} \quad (4)$$

5. Обчислення границі міцності σ_p або σ_c та січного модуля μ в результаті отримання розв'язку алгебраїчної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{1}{y} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{3}{\sigma_i^{(1)}(x, y, p)} \left[\frac{l(x)}{17,61} (\sigma_i^{(1)}(x, y, p) - \sigma_e^{(1)}(x)) \right]^{0,65}, \quad \sigma_e^{(1)}(x) = 0,42 + 0,25 \frac{x^{0,92}}{l(x)}; \\ \varepsilon_p^{(1)}(x, y, z) - 10^{-3} [0,168 + 2,043\sqrt{l(x)} - 0,358q(x, y, p)] = 0; \\ q(x, y, p) = \frac{\sigma_{\text{кк}}^{(1)}(x, y, p)}{\sigma_i^{(1)}(x, y, p)}; \quad l(x) = d \frac{x}{1-x} \end{aligned} \quad (5)$$

Для границі пружності зв'язки використовується вираз із [6] за умови, що коефіцієнт суміжності карбідних зерен $C=0$. Друге рівняння в (5) відповідає деформаційному критерію руйнування кобальтової фази. Її гранична пластичність отримана з розв'язку задачі про розтяг твердого сплаву WC-Co з об'ємним вмістом зв'язуючої фази $V_{Co}=0,4$, за якого досягається максимальна міцність.

Результати досліджень

Результати чисельної реалізації обчислювального алгоритму (1–5) для твердих сплавів WC-Co в залежності від величини середнього розміру карбідних зерен d_{WC} та об'ємного вмісту кобальтової зв'язки V_{Co} наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення границь міцності сплавів WC–Co на розтяг R_m (над ризикою) та на стиск R_{cm} (під ризикою), ГПа

d_{WC} , мкм	V_{Co}						
	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04
20	<u>0,454</u>	<u>0,508</u>	<u>0,575</u>	<u>0,662</u>	<u>0,835</u>	<u>1,108</u>	<u>1,518</u>
	1,201	1,241	1,288	1,348	1,430	1,559	1,816
40	<u>0,314</u>	<u>0,351</u>	<u>0,396</u>	<u>0,454</u>	<u>0,532</u>	<u>0,646</u>	<u>0,949</u>
	1,101	1,129	1,162	1,200	1,250	1,321	1,446
60	<u>0,254</u>	<u>0,283</u>	<u>0,319</u>	<u>0,366</u>	<u>0,428</u>	<u>0,518</u>	<u>0,671</u>
	1,062	1,085	1,114	1,147	1,186	1,240	1,330
80	<u>0,216</u>	<u>0,244</u>	<u>0,275</u>	<u>0,314</u>	<u>0,367</u>	<u>0,444</u>	<u>0,573</u>
	1,041	1,064	1,089	1,117	1,152	1,198	1,271

Отже, як видно з табл. 1, міцність ультракрупнозернистих твердих сплавів WC–Co зростає зі зменшенням середнього розміру зерен карбиду вольфраму і об'ємного вмісту зв'язуючої фази (тобто товщини покриття кобальтом частинок WC).

Для оцінки міцності при випробуванні на стиск твердого сплаву, виготовленого з пористої високомодульної скелетної структури WC(Co), в [2] запропоновано аналітичний алгоритм, пов'язаний з розв'язанням модельної задачі термопружності. Вважалось, що зерна WC утворюють скелет з відповідним значенням коефіцієнта суміжності C . Розрахунки, проведені для твердого сплаву з середнім розміром карбідних зерен $d_{WC} = 40$ мкм та об'ємним вмістом кобальтової зв'язки $V_{Co}=0,16$ за умови відсутності пористості, дають результат $R_{cm}=1,140$ ГПа. Це добре узгоджується з наведеним в табл. 1 значенням $R_{cm}=1,101$ ГПа, враховуючи відсутність карбідного скелету, що послаблює твердий сплав.

Відомо, що найбільша нестабільність експериментальних результатів є характерною для механічних випробувань твердих сплавів на згин. Серед можливих причин цього відзначимо наступне. Під час випробування на поперечний згин в твердосплавному зразку виникає неоднорідний напружений стан з максимальним напруженням розтягу на його поверхні. Величину цього напруження обчислюють з урахуванням вимірюючого руйнуючого навантаження за формулою, використання якої доцільно лише за умови крихкого руйнування. Отже, визначена в такий спосіб границя міцності на згин крупнозернистих середньокобальтових сплавів WC–Co має неконтрольовану похибку, тому є доцільним отримання теоретичних значень цієї механічної характеристики.

Гранична пластичність твердого сплаву за умови випробування на розтяг дорівнює нулю, тобто в цьому випадку має місце крихке руйнування. Тому значення границі міцності на поперечний згин можна отримати з табл. 1, помноживши на 2 числа над ризикою [6]. Результати розрахунків представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Значення границі міцності сплавів WC–Co на згин R_{bm} , ГПа

d_{WC} , мкм	V_{Co}						
	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04
20	0,908	1,016	1,150	1,244	1,670	2,216	3,036
40	0,628	0,702	0,792	0,908	1,064	1,292	1,898
60	0,508	0,566	0,638	0,732	0,856	1,036	1,342
80	0,432	0,488	0,550	0,628	0,734	0,888	1,146

Величина пластичної деформації, що виникає в момент руйнування твердих сплавів WC–Co за умови випробування на стиск, наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Значення граничної пластичної деформації ϵ_p сплавів WC–Co за умови стискання, %

d_{WC} , мкм	V_{Co}						
	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04
20	0,103	0,082	0,064	0,047	0,033	0,022	0,012
40	0,149	0,119	0,092	0,068	0,047	0,029	0,016
60	0,187	0,149	0,115	0,085	0,059	0,037	0,019
80	0,220	0,175	0,135	0,1	0,069	0,043	0,022

Пластичність ультракрупнозернистого матричного твердого сплаву WC–Co при стиску знаходиться в прямій залежності від середнього розміру зерен WC і товщини прошарків кобальту, якими вони покриті. Максимальне значення граничної пластичної деформації має сплав з $V_{Co}=0,16$ і $d_{WC} = 80$ мкм, для якого границя міцності $R_{cm} > \sigma_{0,2}$. Границя міцності R_{cm} сплаву з $V_{Co}=0,1$ і $d_{WC} = 80$ мкм співпадає з умовною границею текучості $\sigma_{0,1}$. Для багатьох інших значень цих мікроструктурних параметрів $R_{cm} < \sigma_{0,05}$, тобто для таких сплавів має місце крихкий механізм руйнування.

Висновки

Встановлено, що границі міцності R_{cm} , R_m і R_{bm} суттєво залежать від розміру зерна WC (в діапазоні від 20 до 80 мкм) і товщини кобальтового покриття δ (від 1,11 мкм до 7,6 мкм), що відповідає об'ємному вмісту Co від 0,04 до 0,16.

Збільшення середнього розміру карбідних зерен та об'ємного вмісту кобальту в 4 рази призводить до зменшення R_{cm} на 43%, а R_m і R_{bm} – на 86%. Пластичність же суттєво зростає зі збільшенням d_{WC} і δ у випадку стискання і відсутня за умови розтягування ультракрупнозернистого твердого сплаву WC–Co.

N. Lytoshenko

V.M. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine

ESTIMATION OF STRENGTH AND PLASTICITY OF WC–Co HARD METALS MADE ON THE BASE OF ULTRA-COARSE-GRAINED WC WITH A COBALT COATING

The objective of the research is to evaluate the level of strength and plasticity under the conditions of tensile, bending and compression testing of a WC–Co hard alloy made of ultra-coarse-grained cobalt-coated WC carbide. And also, to investigate the dependence of the strength limits R_m , R_{bm} , R_{cm} and the limit value of plastic deformation p on the parameters of the microstructure of composites of this class.

It was established that the strength limits R_m , R_{bm} and R_{cm} significantly depend on the size of the WC grain (in the range from 20 to 80 μm) and the thickness of the cobalt coating (from 1.11 μm to 7.6 μm), which corresponds to the volume content of Co from 0.04 to 0.16. An increase in the average size of carbide grains and the volume content of cobalt by 4 times leads to a decrease in R_{cm} by 43%, R_m and R_{bm} by 86%. Plasticity increases significantly with an increase in d_{WC} and in the case of compression and is absent in the case of stretching of the ultra-coarse-grained WC–Co matrix hard alloy.

Key words: WC–Co hardmetal, ultra-coarse-grained WC, cobalt coating, strength, plasticity, structural characteristics, analytical method.

Література

1. Bondarenko V.P., Andreyev I.V., Savchuk I.V., Matviichuk O.O., Ievdokymova O.V., Galkov A.V. Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC. *Int. J. Refract. Hard. Met.* 2013. Vol. 39. P. 18–31.
2. Андреев І.В., Матвійчук О.О., Литошенко Н.В., Гнатенко І.О., Євдокімова О.В. Мікроструктура і властивості пористих скелетних композитів на основі ультракрупнозернистого карбиду вольфраму з металевим покриттям. *Надтв. матер.* 2022. № 4. С. 49–61.
3. Литошенко Н.В., Матвійчук О. О., Андреев І. В. Оцінка міцності та пластичності високомодульних скелетних композитів, отриманих методом просочування. *Інструментальне матеріалознавство. Зб. наук. пр. Вип.25.* Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля. 2022. С. 259–264.
4. Исонкин А.М., Матвейчук А.А. Использование карбида вольфрама газофазной карбидизации для повышения износостойкости алмазосодержащих материалов породоразрушающего инструмента. *Форум гірників – 2015: матеріали міжнародної конференції, 30 вересня – 3 жовтня 2015 р., м. Дніпропетровськ.* Дніпропетровськ.: Національний гірничий університет, 2015. Т.3. С. 70–76.
5. Бондаренко В.П. Современные тенденции в развитии производства и научных исследований в области твердых сплавов в Украине. *Современные спеченные твердые сплавы / ред. Н.В. Новиков.* – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. С. 38–83.
6. Головчан В.Т., Литошенко Н.В. О прочности твердых сплавов системы WC–Co. *Современные спеченные твердые сплавы / ред. Н.В. Новиков.* – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. С. 298–312.
7. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. С. 400.
8. Литошенко Н. В. Оценка условного предела упругости твердого сплава WC–Co при растяжении. *Проблемы прочности.* 1999. № 6. С. 116–122.
9. Бондаренко В.П., Литошенко Н.В. Залишкові термічні напруження в трифазному металокерамічному композиті з шаруватою структурою тугоплавкої складової. *Надтв. матер.* 2019. № 5. С. 95–100.
10. Туманов В.И., Креймер Г.А., Сафонова О.С. и др. Прочностные и пластические свойства твердых сплавов WC–Co при сжатии. *Изв. АН СССР. Металлы.* 1969. № 4. С. 249–252.

Надійшла 22.06.23

References

1. Bondarenko, V.P., Andreyev, I.V., Savchuk, I.V., et al. (2013). Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC. *Int. J. Refract. Hard. Met.* 39, 18–31.
2. Matviichuk, O.O., Lytoshenko, N.V., Hnatenko, I.O., & Ievdokymova, O.V. (2022). Mikrostruktura i vlastuvosti porustuh srtletnuh kompozutiv na osnovi ultrokrupnozernustogo karbidu volframu z metalევum pokruttam [Microstructure and properties of porous skeletal composites on based of the ultracoarsegrained tungsten carbide with metal coating]. *Nadtverdi material – Superhard materials, 4*, 1–14. [in Ukrainian].

3. Lytoshenko, N.V., Matviichuk, O.O., & Andreyev, I.V. (2019). Otsinka mitsnosti ta plastuchnosti vusokomodulnuh skeletnuh kompozitiv, otrumanuh metodom prosochubannya [Evaluation of the strength and plasticity of high-modulus skeletal composites obtained by the infiltration method]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*. (25nd Issue, p. 259–264). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
4. Isonkin, A.M., & Matviichuk, O.O. (2015) Ispolzovanie karbida volframa hasofasnoi karbidizatsii dlia pobusheniia iznosostoikosti almazosodergashchuh materialov porodorazrushayushcheho instrumenta [The use of tungsten carbide gas-phase carbidization to increase the wear resistance of diamond-containing materials of rock-crushing tools] *Forum horniakov – 2015 – Miners' Forum 2015*. (V. 3, s. 70–76) National Mining University [in Russian].
5. Bondarenko, V.P. (2008). Sovremennue tendentsii v razvitii proizvodstva i nauchnuh issledovaniy v oblasti tverduh splavov v Ukraine [Modern trends in the development of production and scientific research in the field of hard alloys in Ukraine]. N.V. Novikov (Ed.). *Sovremennue spechennue tverdue splavu [Modern sintered carbide alloys]*. (p. 38–83). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
6. Golovchan, V.T., & Lytoshenko, N.V. (2008). O prochnosti tverduh cplavov sistemu WC–Co [On the strength of hard alloys of the WC– system Co.]. N.V. Novikov (Ed.). *Sovremennue spechennue tverdue splavu [Modern sintered carbide alloys]*. (p. 298–312). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
7. Shermergor, T.D. (1977). *Teoriia uprugosti mikroneodnorodnuh sred [Theory of elasticity of microinhomogeneous media]*. Nauka [in Russian].
8. Lytoshenko, N.V. (1999). Otsenka uslovnoho predela uprugosti tverdoho splava WC–Co pri rastiashenii [Estimation of the conditional elastic limit of the hard alloy WC–Co during stretching]. *Problemu prochnosti – Strength problems*, 6, 116–122. [in Russian].
9. Bondarenko, V.P., & Litoshenko, N.V. (2019). Residual thermal stresses in a three-phase cermet composite with a layer-structured refractory component [Zalyshkovi termichni napruzheniia v tryfaznomu metalokeramichnomu kompozyti z sharuvatoiu strukturoiu tuhoplavkoi skladovoi]. *Nadtverdi materialy – Superhard Mater.*, 41, 364–368.
10. Tumanov, V.I., Krejmer, G.A., & Safonov, O.S. (1969) Prochnochnue i plasticheskie svoictva tverduh splavov WC–Co pri szhatii [Durability and plasticity properties of WC–Co hard alloys under compression.]. *Izv. AN SSSR. Metaly – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 4, 249–252 [in Russian].