

УДК 621.762

## ЗАЛИШКОВІ ТЕРМІЧНІ НАПРУЖЕННЯ У ТВЕРДИХ СПЛАВАХ З МЕЗОСТРУКТУРОЮ

Н. В. ЛИТОШЕНКО, О. О. МАТВІЙЧУК

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

Аналітичними методами досліджено залишкові термічні напруження в твердих сплавах з мезоструктурою типу  $(WC-Co)^{gran}-Co$ , які суттєво залежать від складу сплаву і об'ємного вмісту фаз. Напруження розтягу в прошарках матриці нижчі, ніж у стандартних твердих сплавах аналогічних марок.

**Ключові слова:** залишкові термічні напруження, твердий сплав, мезоструктура, фазовий склад.

Residual thermal stresses in cemented carbides with a mesostructure of the  $(WC-Co)^{gran}-Co$  type with the help of analytical methods and which significantly depend on the composition and volume content of the phases are investigated. The tensile stress in the matrix layers is lower than the stress in standard cemented carbides of similar grades.

**Keywords:** residual thermal stresses, cemented carbides, mesostructure, phase composition.

**Вступ.** Розроблення композиційних матеріалів з мезоструктурами – актуальне завдання сьогодення [1, 2]. Одним з ефективних методів збільшити робоздатність виробів з твердих сплавів  $WC-Co$ ,  $WC-Ni$ ,  $Cr_3C_2-Ni$ ,  $TiC-WC-Co$  – сформувати в них мезоструктуру, що дасть можливість поліпшити фізико-механічні властивості, досягти одночасно високих зносотривкості та в'язкості руйнування [3], а також збільшити вдвічі значення границі міцності і в чотири рази – деформації руйнування під час випроб на стиск [4]. У твердих сплавах мезоструктура складається з гранул (мезоелементів) – зцементованого зв'язувальним металом ансамблю карбідних частинок та металевої фази. Властивості таких композицій залежать від складу, структури та стану мезоелементів і матриці. Твердосплавні вироби з мезоструктурою перспективні в гірничовидобувній промисловості та машинобудуванні [2]. Зокрема, використовуючи їх у твердосплавних елементах пар тертя та ущільнювальних вузлах, можна досягти найоптимальнішого співвідношення зносотривкості та в'язкості руйнування. Першу властивість забезпечують мезоелементи, а другу – пластична зв'язувальна фаза в міжгранульному просторі.

Фазові складники твердих сплавів з мезоструктурними елементами, об'ємний вміст фаз та товщину прошарку підбирають, як правило, емпірично. Через різні значення теплоємності, теплопровідності та коефіцієнта теплового розширення фаз на міжфазних поверхнях виникають великі напруження. Тому за оптимального вибору складників та їхніх співвідношень можна їх зменшити, а отже, підвищити працездатність сплаву.

Залишкові термічні напруження другого роду виникають під час охолодження мезоструктурного композиту після спікання через різницю значень коефіцієнта теплового розширення і пружних характеристик фаз. Їх рівень – один з найважливіших чинників, що впливають на міцність, в'язкість руйнування та зносотрив-

кість таких матеріалів. Вимірювати термічні напруження на міжфазних межах багатокомпонентного сплаву рентгенівським методом складно, тому для цього використовують аналітичні чи числові розв'язки модельних задач.

Мета дослідження – визначити аналітичними методами залишкові термічні напруження у характерних елементах мікроструктури твердих сплавів, що виникають під час охолодження від температури спікання до кімнатної, а також вивчити залежності локальних напружень від фазового складу і параметрів їх мікроструктури.

**Метод розрахунку залишкових термічних напружень у гранулі та прошарку зв'язувальної фази мезоструктурного композиту.** Для цього використовували відомий у механіці композитів підхід. Припускали, що сферична гранула з радіусом  $a$ , оточена прошарком завтовшки  $b-a$ , знаходиться в необмеженому середовищі з макроскопічними властивостями композиту (рис. 1).

Вважали, що під час охолодження після спікання до кімнатної температури гранула деформується пружно, а матриця не піддається макроскопічним пластичним деформаціям. Оскільки напружено-деформований стан у розглядуваній задачі характеризується центральною симетрією, то систему диференціальних рівнянь термопружності звели до рівняння

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 u) \right) = 0.$$

Вирази для переміщень  $u$ , що є розв'язками цього рівняння, та напружень  $\sigma_r$ , що випливають зі закону Дюгамеля–Неймана [5], мають вигляд

$$u = \alpha t r + B \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_r = -4\mu B \frac{1}{r^3}, \quad r > b, \quad u_2 = A_2 r, \quad \sigma_{r2} = 3K_2 (A_2 - \alpha_2 t), \quad r < a, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – лінійний коефіцієнт теплового розширення;  $\mu$  – модуль зсуву;  $K$  – модуль всебічного стиску;  $t = T_k - T_0$  – перепад між кімнатною температурою і температурою припинення релаксації мікронапружень у фазах під час охолодження сплаву після спікання;  $A, B$  – невизначені сталі. Нижні індекси “1” і “2” відповідають фазам прошарку та зерна, відповідно, а змінні без індексу – композиту. Тут враховано умови  $\sigma_r \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow \infty$  і  $u_2 = 0$  при  $r = 0$ . Задачу розв'язували за контактних умов

$$u_1(b) = u(b), \quad \sigma_{r1}(b) = \sigma_r(b); \quad u_1(a) = u_2(a), \quad \sigma_{r1}(a) = \sigma_{r2}(a), \quad (2)$$

які описують неперервність переміщення  $u_1(r)$  і напруження  $\sigma_{r1}(r)$  за переходу крізь межі прошарку  $r = a$  і  $r = b$ . Враховуючи вирази (1), одержали співвідношення

$$\sigma_{r1}(b) + 4\mu u_1(b) \frac{1}{b} = 4\mu \alpha t, \quad \sigma_{r1}(a) - 3K_2 u_1(a) \frac{1}{a} = -3K_2 \alpha_2 t, \quad (3)$$

що є граничними умовами задачі.

Під час охолодження сплаву від температури спікання у прошарку виникатимуть пружні деформації, тому переміщення і напруження в ньому задають вирази

$$u_1 = A_1 r + B_1 \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_{r1} = 3K_1 (A_1 - \alpha_1 t) - 4\mu_1 B_1 \frac{1}{r^3}, \quad (4)$$

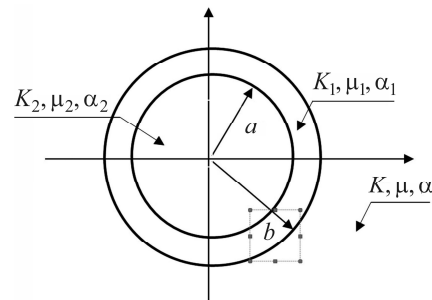


Рис. 1. Розрахункова схема.

Fig. 1. Calculation scheme.

$$\sigma_{\phi 1} = \sigma_{\theta 1} = 3K_1 (A_1 - \alpha_1 t) + 2\mu_1 B_1 \frac{1}{r^3}.$$

Для визначення сталих  $A_1$  і  $B_1$  використали граничні умови (3). В результаті отримали систему двох алгебричних рівнянь

$$\begin{aligned} (3K_1 + 4\mu) A_1 + 4(\mu - \mu_1) B_1 \frac{1}{b^3} &= (4\mu\alpha + 3K_1\alpha_1) t, \\ (3K_1 - K_2) A_1 - (3K_2 - 4\mu_1) B_1 \frac{1}{a^3} &= 3(K_1\alpha_1 - K_2\alpha_2) t, \end{aligned} \quad (5)$$

розв'язок якої має вигляд

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\Delta_1}{\Delta} t, \quad B_1 \frac{1}{a^3} = \frac{\Delta_2}{\Delta} t; \\ \Delta &= -(3K_1 + 4\mu)(3K_2 + 4\mu_1) - 12(K_1 - K_2)(\mu - \mu_1) \left(\frac{a}{b}\right)^3, \\ \Delta_1 &= -(3K_2 + 4\mu_1)(3K_1\alpha_1 + 4\mu\alpha) - 12(K_1\alpha_1 - K_2\alpha_2)(\mu - \mu_1) \left(\frac{a}{b}\right)^3, \\ \Delta_2 &= 3(3K_1 + 4\mu)(K_1\alpha_1 - K_2\alpha_2) - 3(K_1 - K_2)(4\mu\alpha + 3\alpha_1 K_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Отже, залишкові напруження, що виникають під час охолодження сплаву від температури спікання до кімнатної, розраховували за виразом (4), враховуючи систему (6).

Щоб відшукати зв'язок параметрів тривимірної мікроструктури композиту з аналогічними двовимірної (середніми розмірами зерна  $\bar{d}_{\text{grain}}$  і прошарку  $\bar{l}_{\text{layer}}$ ), необхідно скористатися трансцендентним рівнянням [6]

$$\frac{\bar{l}_{\text{layer}}}{\bar{d}_{\text{grain}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{b}{a} - \frac{4a}{\pi b} \left[ \left( 1 - \frac{b^2}{2a^2} \right) \arcsin \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b^2}{a^2} - 1} \right] \right). \quad (7)$$

Таким чином, поданий алгоритм враховує мікроструктурні характеристики реальних композитів для обчислення залишкових термічних напружень. Подібний підхід застосовували раніше [7] для трифазного металокерамічного композиту SiC(WC)–(WC–65Ni) зі шаруватим тугоплавким складником, де отримані результати перевіряли числовим методом.

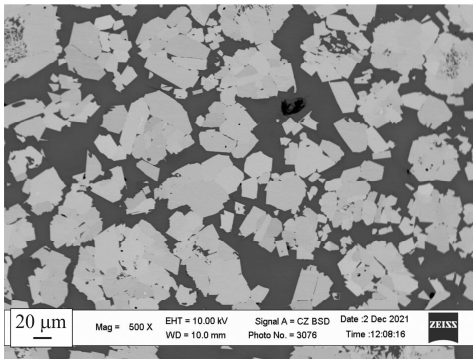


Рис. 2. Твердий сплав з мезоструктурою (WC–Co)<sup>gran</sup>–Co [2].

Fig. 2. A cemented carbide with a (WC–Co)<sup>gran</sup>–Co mesostructure [2].

**Числовий експеримент.** Для розрахунку термічних напружень у гранулі та тонкому зв'язувальному прошарку мезоструктурного композиту, що її оточує, необхідно: задати модулі зсуву  $\mu_1, \mu_2$ , всебічного стиску  $K_1, K_2$ , лінійні коефіцієнти теплового розширення  $\alpha_1, \alpha_2$ , відповідно, для прошарку і гранули (останні слід розрахувати заздалегідь); об'ємну концентрацію гранул  $v_2$ ; інтервал температур формування термічних напружень  $t$ ; обчислити пружні модулі композиту  $\mu$  і  $K$  як середні значення вилок Хашина–Штрикмана [8]; коефіцієнт теплового розширення  $\alpha$  [9]; ви-

значити середні розміри гранули  $\bar{d}_{\text{gran}}$  і прошарку ( $\bar{l}_{\text{layer}}$ ) (рис. 2) [10]; обчислити відношення  $b/a$  для тривимірної моделі; розрахувати залишкові термічні напруження в гранулі  $\sigma^{\text{gran}} = \sigma_{r1}(a)$  і в прошарку  $\sigma^{\text{layer}} = \frac{1}{3}(\sigma_{\kappa} + \sigma_{\phi} + \sigma_{\theta})$ .

Залишкові термонапруження у сплавах WC–Co з різними мікроструктурними параметрами та фазовим складом гранул (вміст Co в гранулі 3; 13 і 25 vol.%, а зв’язувальної фази – 15; 20 і 30 vol.%) обчислювали за модулями всебічного стиску  $K$  і зсуву  $\mu$ , лінійними коефіцієнтами теплового розширення  $\alpha$  для фаз і композитів (табл. 1). Відношення  $b/a$  вибирали, враховуючи мікроструктурні характеристики. Перепад температур, за яких формуються напруження, обирали, беручи до уваги відомі результати [11]: для сплаву WC–Co – це 700°C, а для WC–Ni – це 600°C [7].

**Таблиця 1. Пружні модулі і коефіцієнт теплового розширення матеріалів**

| Фази і сплави                | Вміст зв’язувальної фази,<br>vol.% |           | K   | μ    | α·10 <sup>6</sup> ,<br>K <sup>-1</sup> | Джерело                                                         |
|------------------------------|------------------------------------|-----------|-----|------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                              | у сплаві                           | у гранулі | GPa |      |                                        |                                                                 |
| WC                           | –                                  | –         | 392 | 301  | 5,2                                    | [13, 14]                                                        |
| TiC                          | –                                  | –         | 234 | 198  | 7,95                                   | [16, 17]                                                        |
| Co                           | –                                  | –         | 187 | 81,5 | 13,4                                   | [11]                                                            |
| Ni                           | –                                  | –         | 156 | 72   | 12,8                                   | [15, 12]                                                        |
| (WC–Co) <sup>gran</sup> –Co  | 15                                 | 3         | 342 | 238  | 6,3                                    | Розра-<br>ховано<br>за фор-<br>мула-<br>ми з<br>праць<br>[8, 9] |
|                              |                                    | 13        | 320 | 212  | 6,9                                    |                                                                 |
|                              |                                    | 25        | 296 | 186  | 7,6                                    |                                                                 |
|                              | 20                                 | 3         | 330 | 223  | 6,6                                    |                                                                 |
|                              |                                    | 13        | 310 | 200  | 7,2                                    |                                                                 |
|                              |                                    | 25        | 288 | 177  | 7,9                                    |                                                                 |
|                              | 30                                 | 3         | 306 | 197  | 7,3                                    |                                                                 |
|                              |                                    | 13        | 290 | 179  | 7,8                                    |                                                                 |
|                              |                                    | 25        | 273 | 161  | 8,5                                    |                                                                 |
| (WC–Ni) <sup>gran</sup> –Ni  | 15                                 | 13        | 304 | 205  | 6,7                                    |                                                                 |
| (TiC–Ni) <sup>gran</sup> –Ni |                                    |           | 218 | 166  | 8,7                                    |                                                                 |
| (TiC–Co) <sup>gran</sup> –Co |                                    |           | 225 | 169  | 8,9                                    |                                                                 |
| WC–Co                        |                                    | –         | 349 | 246  | 6,1                                    |                                                                 |
| WC–Ni                        |                                    |           | 338 | 240  | 6,0                                    |                                                                 |
| TiC–Co                       |                                    |           | 226 | 173  | 8,7                                    |                                                                 |
| TiC–Ni                       |                                    |           | 220 | 170  | 8,6                                    |                                                                 |

Результати обчислень залишкових термонапружень наведено в табл. 2. Виявили, що напружений стан композитів (WC–Co)<sup>gran</sup>–Co з мезоструктурою суттєво залежить від вмісту зв’язувальної фази в сплаві та гранулах. Гранули композитів WC–Co, WC–Ni, TiC–Co, TiC–Ni знаходяться під впливом стискальних напружень  $\sigma^{\text{gran}}$ , а прошарки з Co та Ni – під дією розтягальних  $\sigma^{\text{layer}}$ . Про суттєвий вплив металу фази прошарку на термонапружений стан сплавів свідчить їх зни-

ження для кобальтової та нікелевої фаз. Нікель суттєво зменшує залишкові напруження, а зі заміною карбіду WC на TiC у сплавах, де як легкоплавку фазу використовували Co, також знижуються напруження в прошарках, чого не зафіксували у сплаві з нікелевою зв'язувальною фазою (табл. 2).

**Таблиця 2. Залишкові термічні напруження в гранулі та в прошарку мезоструктурних композитів**

| Сплав                                     | Вміст зв'язувальної фази, vol.% |           | $\sigma^{\text{gran}}$ | $\sigma^{\text{layer}}$ |
|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
|                                           | у сплаві                        | у гранулі | МПа                    |                         |
| $(\text{WC-Co})^{\text{gran}}-\text{Co}$  | 15                              | 3         | -25                    | 1134                    |
|                                           |                                 | 13        | -58                    | 1020                    |
|                                           |                                 | 25        | -62                    | 901                     |
|                                           | 20                              | 3         | -135                   | 1045                    |
|                                           |                                 | 13        | -157                   | 938                     |
|                                           |                                 | 25        | -151                   | 825                     |
|                                           | 30                              | 3         | -366                   | 858                     |
|                                           |                                 | 13        | -339                   | 788                     |
|                                           |                                 | 25        | -314                   | 687                     |
| $(\text{WC-Ni})^{\text{gran}}-\text{Ni}$  | 15                              | 13        | -37                    | 470                     |
| $(\text{TiC-Ni})^{\text{gran}}-\text{Ni}$ |                                 |           | -40                    | 470                     |
| $(\text{TiC-Co})^{\text{gran}}-\text{Co}$ |                                 |           | -66                    | 689                     |
| WC-Co                                     |                                 | -         | -13                    | 1172                    |
| WC-Ni                                     |                                 |           | -22                    | 796                     |
| TiC-Co                                    |                                 |           | -60                    | 723                     |
| TiC-Ni                                    |                                 |           | -35                    | 483                     |

## ВИСНОВКИ

Встановлено рівень залишкових термічних напружень у гранулах  $\sigma^{\text{gran}}$  та прошарках  $\sigma^{\text{layer}}$  мезоструктурних твердих сплавів  $(\text{WC-Co})^{\text{gran}}-\text{Co}$ ,  $(\text{WC-Ni})^{\text{gran}}-\text{Ni}$ ,  $(\text{TiC-Co})^{\text{gran}}-\text{Co}$ ,  $(\text{TiC-Ni})^{\text{gran}}-\text{Ni}$ , що виникають під час його охолодження від температури спікання до кімнатної. Досліджено залежність локальних напружень від вмісту зв'язувальної фази в гранулі та твердому сплаві за товщини прошарку, що складає 10% від радіуса гранули. Зі збільшенням її вмісту від 15 до 30 vol.% стискальні напруження в гранулі з карбіду WC з вмістом зв'язувального 3...25 vol.% зростають від -25 до -366 МПа, а напруження розтягу в прошарку з Co змінюються від 1134 до 687 МПа. Значення розтягуючи напружень в прошарках матриці нижчі, ніж у стандартних твердих сплавах аналогічних марок, зокрема для  $(\text{WC-Ni})^{\text{gran}}-\text{Ni}$  – на 69%, а для  $(\text{WC-Co})^{\text{gran}}-\text{Co}$  – на 30%.

1. Лисовский А. Ф. Теория и практика формирования мезоструктур в композиционных материалах. Обзор // Надтверді матеріали. – 2020. – № 3. – С. 3–23.

2. *Technology of formation of mesostructures in sintered WC–Co and WC–Ni solid alloys* / O. O. Matviichuk, I. V. Andreiev, I. O. Hnatenko, O. V. Ievdokymova, S. A. Davydenko, and M. O. Tsysar // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 29. – P. 175–179.  
<https://doi.org/10.1007/s11003-022-00646-2>
3. *Mechanical properties of a hybrid cemented carbide composite* / X. Deng, D. R. Patterson, K. K. Chavla, M. C. Koopman, Z. Fong, G. Lockwood, and A. Griffo // *Int J. Refr. Met. Hard. Mater.* – 2001. – **19**, № 4–6. – P. 547–552. [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(01\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(01)00060-9)
4. Бондарь М. П., Корчагин М. А., Ободовский Е. С. Высокоэнергетические методы создания мезокомпозитного материала с включениями, содержащими нанокристаллические частицы // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – **46**, № 1. – С. 126–131.
5. Писаренко Г. С., Можаровский М. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – К.: Наук. думка, 1981. – 494 с.
6. Литошенко Н. В. Алгоритм определения отношения толщины кобальтовой прослойки к размеру карбидного зерна по результатам измерения в плоскости шлифа // *Сверхтвердые материалы*. – 2007. – № 4. – С. 5–7.
7. Bondarenko V. P. and Litoshenko N. V. Residual thermal stresses in a three-phase cermet composite with a layer-structured refractory component // *J. Superhard Mater.* – 2019. – **41**, № 5. – P. 364–368. <https://doi.org/10.3103/S1063457619050095>
8. Hashin Z. and Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1963. – **11**. – P. 127–140.  
[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
9. *Механика композитов* / Под общ. ред. А. Н. Гузя. Т. 3: Статистическая механика и эффективные свойства материалов / Под ред. Л. П. Хорошуна. – К.: Наук. думка, 1993. – 390 с.
10. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 374 с.
11. Golovchan V. T., Bondarenko V. P., and Litoshenko N. V. Strength of polycrystalline tungsten monocarbide under tension // *Strength of Mater.* – 2003. – **35**. – P. 387–394.  
DOI: 10.1023/A:1025894409190
12. Krawits A. D., Reichel D. G., and Hittelman R. Residual stress and stress distribution in a WC–Ni composite // *Mater. Sci. Eng.* – 1989. – **119**, № 1/2. – P. 127–134.
13. A systematic investigation of elastic moduli of WC–Co alloys / H. Doi, Y. Fujiwara, K. Miyake, and Y. Oosawa // *Met. Trans.* – 1970. – **1**, № 5. – P. 1417–1425.  
<https://doi.org/10.1007/BF02900264>
14. Krawits A. D., Reichel D. G., and Hittelman R. Thermal expansion of tungsten carbide at low temperature // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2005. – **72**, № 3. – P. 515–517.  
DOI: 10.1111/j.1151-2916.1989.tb06169.x
15. Корнієнко А. О. Напружено-деформований стан у композиційному матеріалі при терті за підвищених температур // *Проблеми тертя та зношування*. – 2013. – № 2. – С. 88–91.
16. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. – Челябинск: Металлургия, 1989. – 368 с.
17. *Алюмонітридні функціональні матеріали, одержані з нанодисперсних та мікронних порошків гарячим пресуванням та вільним спіканням* / І. П. Фесенко, М. М. Прокопів, В. І. Часник, О. М. Кайдаш, Г. С. Олійник, М. О. Кузенкова – К.: ІВЦ АЛКОН, 2015. – 172 с.

Одержано 10.11.2023