

Н. В. Литошенко (м. Київ)

**Залежність міцності та пластичності
середньозернистих твердих сплавів
WC–6 % Co від деформаційних
характеристик кобальтової і карбідної фаз**

За допомогою розрахункового алгоритму досліджено вплив деформаційних характеристик карбідної фази та кобальтової зв'язки на міцність та пластичність твердого сплаву WC–Co.

Ключові слова: твердий сплав WC–Co, розрахунковий алгоритм, властивості фаз, структурні параметри, деформаційні характеристики.

ВСТУП

Тверді сплави WC–Co з однаковим об'ємним вмістом зв'язуючої фази відрізняються за деформаційними характеристиками залежно від технології їх виготовлення. Температура карбідизації та спікання, різні методи отримання карбиду вольфраму, вміст розчиненого вуглецю та вольфраму в зв'язці – все це впливає на міцність та пластичність кобальтової та карбідної фаз, а в результаті, на якість та експлуатаційні характеристики твердих сплавів. Про висвітлення цього питання з використанням аналітичних методів в публікаціях автору не відомо.

В зв'язку з цим метою роботи є дослідження за допомогою розробленого аналітичного алгоритму, що використовує математичний апарат механіки композитних матеріалів, наскільки суттєвим може бути вплив деформаційних характеристик кобальтової і карбідної фаз на міцність та граничну пластичну деформацію сплаву WC–6 % Co при випробовуванні на стиск.

ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ФАЗ ТВЕРДОГО СПЛАВУ WC–Co

Діаграму деформування матеріалу в умовах одновісного напруженого стану (розтяг, стиск) схематично представлено на рисунку. Її аналітичний опис задається рівностями

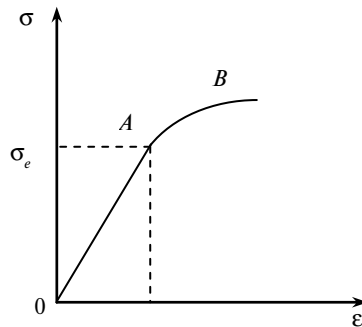
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \sigma < \sigma_e; \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p, \quad \varepsilon_p = f(\sigma), \quad \sigma > \sigma_e, \quad (1)$$

де σ – напруження; ε – деформація; σ_e – границя пружності; ε_p – пластична деформація.

Відрізок пружного деформування OA на рисунку визначається модулем пружності E , а відрізок деформаційного зміцнення AB – функцією $f(\sigma)$. Інтенсивність деформаційного зміцнення задається коефіцієнтом

$$n = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \left(\frac{1}{E} + \frac{df}{d\sigma} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Деформаційні характеристики композитного матеріалу визначаються пластичністю і міцністю його компонентів. Проблема полягає в тому, що *in*



Діаграма деформування матеріалу в умовах одновісного напруженого стану.

situ пластичні властивості фаз твердого сплаву можуть суттєво відрізнятися від деформаційних властивостей компактних кобальту і полікристалічного карбіду вольфраму. По-перше, металічна зв'язка – твердий розчин атомів вольфраму і вуглецю на основі кобальту, що знаходиться в сплаві у вигляді тонких прошарків. І, по-друге, карбідний каркас утворюється лише частиною граничних поверхонь зерен WC. У зв'язку з цим для отримання співвідношень, що описують деформаційні властивості фаз, необхідно використовувати лише встановлені експериментальним шляхом надійні результати для твердих сплавів WC–Co. Вибираємо співвідношення для границі пружності

$$\sigma_{0,05} = C \left(1,63 + \frac{3,5}{\sqrt{d_{WC}}} \right); \quad V_{Co} < 0,2,$$

яке витікає з експериментальних даних, отриманих в [1]. Тут C – коефіцієнт суміжності карбідних зерен; d_{WC} – середній діаметр карбідних зерен; V_{Co} – об'ємний вміст кобальтової фази. Це співвідношення використовували для твердих сплавів марок ВК3, ВК6 і ВК12 в інтервалі середніх діаметрів $d_{WC} = 1,0\text{--}2,4$ мкм при різних значеннях коефіцієнта суміжності C . Після статистичної обробки результатів обчислень отримані наступні вирази для границь пружності та для рівнянь, що описують відрізки деформаційного зміцнення діаграм деформування фаз:

$$\begin{aligned} \sigma_e^{(1)} &= 0,42 + 0,86C + 0,25 \frac{V_{Co}^{0,92}}{l_{Co}(1-C)}; & \epsilon_p^{(1)} &= \left[(\sigma - \sigma_e^{(1)}) \frac{l_{Co}}{17,61} \right]^{1,54}, \quad \sigma > \sigma_e^{(1)}; \\ \sigma_e^{(2)} &= 0,28 + 1,32C + 2,83 \frac{C}{\sqrt{d_{WC}}}; & \epsilon_p^{(2)} &= \left[(\sigma - \sigma_e^{(2)}) \frac{\sqrt{d_{WC}}}{82,52} \right]^{1,56}, \quad \sigma > \sigma_e^{(2)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де l_{Co} – середня товщина кобальтових прошарків, мкм; індекс 1 відноситься до зв'язки, а індекс 2 – до карбіду вольфраму. Параметри мікроструктури вимірюються в площині шліфа та пов'язані наступними співвідношеннями [2]:

$$\frac{l_{Co}}{d_{WC}} = \frac{1}{1-C} \frac{V_{Co}}{V_{WC}}, \quad C = 1 - V_{Co}^{0,644} \cdot \exp(0,391V), \quad V_{Co} < 0,37, \quad 0,47 < d_{WC} < 2,1,$$

де V – коефіцієнт варіації розподілу зерен WC за розмірами; V_{WC} – об'ємний вміст карбідної фази.

У вище наведених формулах розмірністю напруження є ГПа, а мікро-структурних параметрів l_{Co} та d_{WC} – мкм. Оскільки отримані залежності містять параметри мікроструктури твердого сплаву, то вони відображають деформаційні *in situ* властивості фаз серійних твердих сплавів WC–Co.

Для порівняння деформаційних властивостей зв'язки і карбідної фази в твердих сплавах WC–Co можуть бути використані два параметри: границя пружності σ_e і коефіцієнт деформаційного зміцнення $n(\sigma)$. Використовуючи вирази для пластичної деформації фаз з рівностей (3), отримуємо з врахуванням (2) наступні формули для коефіцієнтів деформаційного зміцнення фаз твердого сплаву WC–Co:

$$\begin{aligned} n^{(1)} &= \left\{ \frac{1}{E_1} + 8,7 \cdot 10^{-2} l_{Co} \left[\frac{(\sigma - \sigma_e^{(1)}) l_{Co}}{17,61} \right]^{0,54} \right\}^{-1}, \\ n^{(2)} &= \left\{ \frac{1}{E_2} + 1,89 \cdot 10^{-2} \sqrt{d_{WC}} \left[\frac{(\sigma - \sigma_e^{(2)}) \sqrt{d_{WC}}}{82,52} \right]^{0,56} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

При навантаженні твердого сплаву марки типу ВК6 з $d_{WC} = 2,2$ мкм до руйнування коефіцієнт $n^{(1)}$ зменшується від 213 до 51 (в чотири рази), а коефіцієнт $n^{(2)}$ – від 719 до 147 (майже в п'ять разів).

В [2, 3] наведено теоретичний алгоритм для побудови діаграм деформування твердих сплавів WC–Co при випробовуваннях на стиск, розтяг та згин. Тут представлено розрахункові значення границь міцності та граничної пластичної деформації дрібно-, середньо- та крупнозернистих твердих сплавів WC–Co в широкому діапазоні об'ємного вмісту кобальтової зв'язки. В алгоритмі використовуються фізичні рівняння теорії малих пружно-пластичних деформацій [4]. При цьому вважається, що руйнування сплаву ініціюється руйнуванням карбідного каркасу. Як критерій міцності карбідної фази використовується гіпотеза Баландіна [5]:

$$(\sigma_i^{(2)})^2 + 3\sigma_0^{(2)}(R_{cm}^{(2)} - R_m^{(2)}) = R_{cm}^{(2)} R_m^{(2)},$$

де $R_{cm}^{(2)}$ і $R_m^{(2)}$ – границі міцності при стиску та розтягу відповідно; $\sigma_i^{(2)}$ – інтенсивність напружень; $\sigma_0^{(2)}$ – середнє арифметичне нормальних напружень. Для границь міцності фази WC використовуються наступні вирази:

$$R_{cm}^{(2)} = \left(2,4 + \frac{5,6}{\sqrt{d_{WC}}} \right) \sqrt{C}; \quad R_m^{(2)} = \left(0,3 + \frac{0,64}{\sqrt{d_{WC}}} \right) \sqrt{C}, \quad 0,5 < d_{WC} < 3,0.$$

Непрямим підтвердженням фізичної правдоподібності цих виразів є відповідність обчислених та експериментальних значень границь міцності твердих сплавів WC–Co при стиску та розтягу з об'ємним вмістом кобальту від 0,1 до 0,37.

Слід зазначити, що у випадку випробовування на стиск враховуються пластичні деформації карбідної фази. До уваги також беруться залишкові термічні напруження, які виникають в процесі охолодження після спікання в фазах твердого сплаву. Практичне використання алгоритму пов'язане з необхідністю розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь [3].

ПОРІВНЯННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ

Для підтвердження адекватності якісного та кількісного відображення запропонованою математичною моделлю характерних особливостей руйнування реальних твердих сплавів наведемо відносно нові експериментальні дані з [6]. У першому та другому стовпчиках табл. 1 представлено тверді сплави WC–Co в позначеннях з [6] та об'ємний вміст зв'язки в них. Розміри карбідних зерен d_{WC} , що використано при розрахунках, подано в третьому стовпчику. При цьому вони дорівнюють середньому (1,05, 0,65, 0,35) значенню з наведених в [6] інтервалів: 0,8–1,3, 0,5–0,8, 0,2–0,5 мкм відповідно. Оскільки дані про коефіцієнти суміжності зерен WC і розподіли карбідних зерен за розмірами досліджуваних сплавів в [6] відсутні, значення коефіцієнта суміжності C вибирається характерним для певної марки сплаву [2, 3]. Таким чином, маємо три незалежних структурних параметри сплаву в якості вхідної інформації для розрахункового алгоритму.

Таблиця 1. Порівняння обчислених (над ризикою) та вимірних (під ризикою) значень умовних границь текучості та границі міцності при стиску твердих сплавів WC–Co

Сплав [6]	V_{Co}	d_{WC} , мкм	C	$R_{p0,05}$, ГПа	$R_{p0,1}$, ГПа	$R_{p0,2}$, ГПа	R_{cm} , ГПа	ϵ_p , %
X1	0,19	1,05	0,55	<u>2,78</u>	<u>3,10</u>	<u>3,50</u>	<u>5,75</u>	0,97
				2,41	2,89	3,43	> 5,10	
X2	0,15	то же	0,61	<u>3,10</u>	<u>3,40</u>	<u>3,90</u>	<u>6,12</u>	0,93
				2,69	3,33	4,03	5,61	
X3	0,10	«	0,68	<u>3,45</u>	<u>3,80</u>	<u>4,30</u>	<u>6,50</u>	0,88
				3,70	4,24	4,85	6,47	
X4	0,16	0,65	0,60	<u>3,56</u>	<u>4,00</u>	<u>4,60</u>	<u>7,13</u>	0,82
				3,48	3,98	4,59	> 6,58	
X5	0,14	0,35	0,63	<u>4,80</u>	<u>5,40</u>	<u>6,20</u>	<u>9,24</u>	0,70
				4,82	5,37	6,08	> 8,50	

В наступних трьох стовпчиках таблиці вказано умовні границі текучості, що відповідають значенням пластичної деформації 0,05, 0,1 і 0,2 %. У восьмому стовпчику представлено значення границь міцності сплавів, при цьому зразки X1, X4 і X5 не були зруйновані [6]. В останньому стовпчику наведено розраховані значення граничної пластичної деформації.

Як витікає з табл. 1, найбільша (9 %) різниця між отриманими експериментальними та теоретичними значеннями границі міцності спостерігається у випадку твердого сплаву X2. При цьому, якщо вибрати з наведеного інтервалу значення $d_{WC} = 1,2$ мкм, то ця різниця буде становити 4 %. Більш точна відповідність між теорією та експериментом, очевидно, не має сенсу, оскільки останній завжди пов'язаний з деякою похибкою. Значення обчислених границь міцності сплавів X1, X4 і X5 (які не були зруйновані) можна вважати достовірними, якщо мати на увазі інформацію фірми “Ceratzit” (Люксембург), тверді сплави якої використовували у [6]. За її даними границя міцності при стиску сплаву типу ВК6 з середнім розміром карбідних зерен (0,8–1,3) мкм дорівнює 6,4 ГПа. Обчислені значення границі міцності для

цього сплаву у випадку, коли d_{WC} дорівнює 0,8, 1,1, 1,3 мкм, становлять 7,14, 6,40, 6,06 ГПа відповідно.

Крім тонкодисперсних сплавів WC-Co розглянемо також середньо- та крупнозернисті тверді сплави. Отримаємо, як приклад, для сплаву марки BK6 з середнім розміром карбідних зерен $d_{WC} = 2,2$ мкм і коефіцієнтом суміжності карбідної фази $C = 0,677$ границю міцності і граничну пластичну деформацію при випробуванні на стиск. Вони становлять $R_{cm} = 5,13$ ГПа і $\varepsilon_p = 1,07$ % відповідно. Експериментальні значення таких характеристик даної марки серійного твердого сплаву – $R_{cm} = 4,95$ ГПа і $\varepsilon_p = 1,1$ % [7]. Таким чином, розрахункові та експериментальні результати практично співпадають. Наведені в [3] експериментальні дані про R_{cm} для крупнозернистих сплавів з масовим вмістом кобальту від 6 до 25 %, виготовлених фірмами “Plansee Tizit GmbH” (Австрія) і “AB Sandvik Hard Materials” (Швеція), та розраховані автором є також досить близькими. Так, наприклад, для WC–6 % Co з $d_{WC} = 3,0$ мкм експериментальне значення $R_{cm} = 4,7$ ГПа, а теоретичне – 4,4 ГПа.

На підставі наведеного вище вважаємо за можливе використовувати розроблений аналітичний метод [2, 3] для встановлення впливу деформаційних характеристик кобальтової та карбідної фаз на міцність та пластичність середньозернистих твердих сплавів WC–6 % Co.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Міцність твердого сплаву WC–6 % Co визначається переважно такими характеристиками карбідного скелету як границя пружності та границі міцності при розтягу та стиску. Його пластичність, в свою чергу, залежить від пластичності карбідної фази. Як, наприклад, свідчать результати експериментальних досліджень з [8], мікротвердість, а також міцність і пластичність при стиску сплавів BK можуть суттєво відрізнитися в залежності від температури карбідизації. Автори пояснюють підвищення цих властивостей при збільшенні температури карбідизації вольфраму утворенням WC з більш досконалою кристалічною ґраткою, а також видаленням значної кількості домішок. Таким чином, деформаційні характеристики карбідних скелетів твердих сплавів WC–Co з однаковим вмістом зв'язки можуть відрізнитися. Для дослідження цього питання виконаємо відповідні розрахунки для сплаву WC–6 % Co з середнім розміром карбідних зерен 2,2 мкм і коефіцієнтом суміжності карбідної фази 0,677. Змінимо границі пружності та міцності фази WC в a разів, а граничну пластичну деформацію – в b разів.

Результати обчислень представлені в табл. 2. Другий стовпчик таблиці містить дані про міцність та пластичність сплаву при умові абсолютної крихкості його карбідної фази ($b = 0$), а числа в останньому стовпчику відповідають деформаційним характеристикам серійного BK6. Видно, що гранична пластична деформація сплаву суттєво зменшується як при зменшенні міцності тугоплавкої фази, так і при умові падіння її пластичності. Що стосується міцності сплаву, то цей параметр практично не залежить від пластичності карбідного скелету, а визначається лише його міцністю.

Таким чином, аналіз табл. 2 свідчить про сильний вплив на міцність та пластичність малокобальтового твердого сплаву при випробуванні на стиск границь пружності і міцності, а також граничної пластичної деформації його карбідної фази. Значення R_{cm} для сплаву WC–6 % Co може зменшуватись на 28 %, а його гранична пластична деформація – на 13–99 % при падінні міцності на 30 % та зменшенні до нуля пластичності його карбідного скелету.

Таблиця 2. Залежність міцності R_{cm} , ГПа (над ризкою) і пластичності ϵ_p , % (під ризкою) при стиску твердого сплаву WC–6 % Co від деформаційних характеристик карбідної фази

a	b				
	0	0,25	0,50	0,75	1,0
0,7	<u>3,68</u>	<u>3,70</u>	<u>3,72</u>	<u>3,73</u>	<u>3,75</u>
	0,009	0,175	0,34	0,51	0,67
0,8	<u>4,13</u>	<u>4,16</u>	<u>4,18</u>	<u>4,20</u>	<u>4,21</u>
	0,013	0,21	0,41	0,60	0,80
0,9	<u>4,59</u>	<u>4,61</u>	<u>4,63</u>	<u>4,65</u>	<u>4,67</u>
	0,017	0,25	0,47	0,70	0,93
1,0	<u>5,04</u>	<u>5,06</u>	<u>5,09</u>	<u>5,11</u>	<u>5,13</u>
	0,02	0,28	0,55	0,81	1,07

Встановимо також, як впливає швидкість деформаційного зміцнення фази WC на міцність та пластичність досліджуваного твердого сплаву. Зменшимо границю міцності фази WC при розтягу R_m^{WC} , а також границі пружності σ_e^{WC} та міцності R_{cm}^{WC} карбідної фази при стиску на 20 %. Це призводить до зниження границі міцності при стиску сплаву BK6 на 18 %, а граничної пластичної деформації на 26 %. При додатковому збільшенні n^{WC} на 10 % границя міцності твердого сплаву при стиску R_{cm} зменшується на 19 %, а його пластичність ϵ_p – на 54 %. Якщо збільшити на 10 % лише швидкість деформаційного зміцнення n^{WC} (при незмінних R_m^{WC} , σ_e^{WC} і R_{cm}^{WC}), то значення границі міцності на стиск сплаву BK6 практично не зміняться, в той час як його гранична пластична деформація ϵ_p зменшиться на 37 %. Таким чином, найбільший вплив на пластичність твердого сплаву має параметр n^{WC} діаграми стиску карбідної фази, якій визначає швидкість деформаційного зміцнення та пластичну деформацію карбідного скелету.

Аналітичні дослідження впливу параметрів діаграм напруження–деформація кобальтової фази на міцність та пластичність твердих сплавів показали, що деформаційні характеристики кобальтової фази дуже мало впливають на міцність сплаву при стиску. Так, наприклад, при зменшенні пластичності і границі пружності кобальтової зв'язки середньозернистого твердого сплаву BK6 на 50 % значення його границі міцності R_{cm} практично не змінюється.

ВИСНОВКИ

Таким чином, проведені розрахунки дозволяють стверджувати, що на міцність та граничну пластичну деформацію середньозернистого сплаву WC–6 % Co при випробовуванні на стиск мають сильний вплив такі деформаційні характеристики карбідної фази, як границі пружності та міцності, швидкість деформаційного зміцнення та пластична деформація карбідного скелету. В той час як деформаційні характеристики кобальтової фази дуже мало впливають на міцність цього сплаву при стиску.

С помощью расчетного алгоритма исследовано влияние деформационных характеристик карбидной фазы и кобальтовой связки на прочность и пластичность твердого сплава WC–Co.

Ключевые слова: твердый сплав WC–Co, расчетный алгоритм, свойства фаз, структурные параметры, деформационные характеристики.

The effect of deformation characteristics of the carbide phase and cobalt binder on the strength and plasticity of the WC–Co hard alloy has been studied using a calculation algorithm.

Keywords: WC–Co hard alloy, computational algorithm, properties of the phases, structural parameters, deformation characteristics.

1. Chermant J. L., Osterstock F. Elastic and plastic characteristics of WC–Co composite materials // Powder Metal. Int. – 1979. – **11**, N 3. – P. 106–109.
2. Головчан В. Т., Литошенко Н. В. О прочности твердых сплавов системы WC–Co // Современные спеченные твердые сплавы. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – С. 298–312.
3. Golovchan V. T., Litoshenko N. V. The stress-strain behavior of WC–Co hardmetals // Comp. Mater. Science. – 2010. – **49**, N 3. – P. 241–244.
4. Писаренко Г. С., Мажоровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наук. думка, 1981. – 494 с.
5. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 326 с.
6. Kluensner T., Marsoner S., Ebner R. et al. Influence of microstructure on stress-strain behaviour of WC–Co hard metals in static and cyclic loading // Proc. 17th Plansee Seminar. – 2009. – **3**, AT10/1–10.
7. Линдо Г. В., Чистякова В. А., Песков Б. А. и др. Исследование пластических свойств и износостойкости буровых твердых сплавов // Твердые сплавы. Структура и свойства буровых твердых сплавов: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИТС, 1983. – С. 63–65.
8. Самсонов Г. В., Витрянюк В. Н., Чаплыгин Ф. И. Карбиды вольфрама. – Киев: Наук. думка, 1974. – 174 с.

Ин-т надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України

Надійшла 16.01.12