

УДК 669.018.25.002.35

В. П. Бондаренко, член-кор. НАН України,
Н. В. Литошенко, В. П. Ботвинко, кандидати технічних наук

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

МОЖЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ WC-Co ЗА РОЗПОДІЛОМ РОЗМІРІВ КАРБІДНИХ ЗЕРЕН

Висвітлено можливості використання комп'ютерної програми для прогнозування фізико-механічних та експлуатаційних властивостей твердих сплавів WC-Co у широкому діапазоні розмірів зерен WC та вмісту з'язуючої фази.

Ключові слова: *твердий сплав WC-Co, структурні параметри, фізико-механічні та експлуатаційні властивості, комп'ютерна програма.*

Вступ

Теоретичні методи і підходи для розрахунку структурних характеристик та властивостей вольфрамо-кобальтових твердих сплавів, що базуються на фундаментальних положеннях фізичного матеріалознавства та механіки пружно-пластичних композитів наведено в [1–4]. З огляду на хорошу узгодженість отриманих в цих роботах теоретичних значень з відповідними сучасними експериментальними даними відомих світових виробників твердих сплавів WC-Co, створено комп'ютерну програму, за допомогою якої можна швидко розраховувати параметри мікроструктури а також визначити фізико-механічні і експлуатаційні характеристики твердих сплавів WC-Co в широкому діапазоні вмісту кобальтової зв'язки (3–30% мас.) і розмірів карбідних зерен (0,1–20 мкм). Мета даного повідомлення – продемонструвати можливості застосування розробленого програмного продукту на прикладі твердих сплавів марки BK8, спечених за різними технологіями.

Числовий експеримент

Для дослідження впливу легування на стан карбідного скелету та властивості твердих сплавів виготовили зразки зі стандартної суміші марки BK8. Як легуючі добавки застосовували карбіди танталу TaC і ванадію VC концентрації яких складали 0,05 і 0,1%. Спикання здійснювали в метано-водневому середовищі за температури 1450, 1470 і 1500 °C. У результаті металографічних досліджень цих сплавів отримали розподіли карбідних зерен WC за розмірами. Результати наведено в перших восьми графах табл. 1. Надалі використовуємо цю інформацію для комп'ютерних розрахунків

Необхідні вхідні дані для розробленої програми: масова концентрація кобальту в сплаві WC-Co, яку визначаємо за маркою сплаву – 8, розподіл карбідних зерен WC за розмірами, який отримуємо відповідно до ГОСТ 9391-80 металографічним методом (див. табл. 1 графи 3–8).

Таблиця 1. Структурні параметри твердих сплавів ВК8

Сплав	$T_{ст}, ^\circ\text{C}$	WC, %						$d_{WC},$ МКМ	$l_{Co},$ МКМ	V	C	$S_{WC/WC},$ МКМ ⁻¹	$S_{WC/Co},$ МКМ ⁻¹
		1 МКМ	2 МКМ	3 МКМ	4–5 МКМ	6–7 МКМ	8–10 МКМ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВК8 вихідний	1450	48	20	20	10	1	1	2,1	0,9	0,68	0,65	0,54	0,59
	1470	43	23	10	11	5	9	2,8	1,1	0,9	0,62	0,38	0,48
ВК8+0,05% VC	1450	54	27	13	5	-	-	1,7	0,8	0,95	0,66	0,67	0,69
	1470	49	18	17	11	4	1	2,2	0,9	0,73	0,64	0,50	0,57
	1500	50	18	15	11	1	5	2,3	0,9	0,85	0,62	0,46	0,57
ВК8+0,05% TaC	1450	63	21	9	5	1	1	1,7	0,7	0,75	0,63	0,65	0,75
	1470	52	22	12	8	3	3	2,1	0,9	0,83	0,62	0,50	0,61
	1500	43	16	14	17	4	6	2,6	1,1	0,80	0,63	0,40	0,47
ВК8+0,1% TaC	1450	66	18	12	1	1	2	1,7	0,7	0,83	0,62	0,65	0,78
	1470	55	20	10	10	3	2	2,1	0,9	0,81	0,63	0,52	0,63
	1500	54	15	10	12	4	5	2,4	1,0	0,89	0,61	0,45	0,56
ВК8 серійний	1450	45	21	15	12	4	3	2,4	1,0	0,78	0,63	0,46	0,54

За допомогою формул лінійного аналізу та виразу для визначення коефіцієнта суміжності карбідних зерен сплавів WC-Co [1] розраховуються такі структурні параметри: середній розмір карбідних зерен d_{WC} , коефіцієнт варіації розмірів зерен WC у сплаві V , коефіцієнт суміжності карбідної фази C , середній розмір кобальтових прошарків l_{Co} , а також питома площа міжзеренної поверхні $S_{WC/WC}$ і міжфазної $S_{WC/Co}$. Значення наведених характеристик для досліджуваних сплавів розміщено в табл. 1.

З'ясуємо, як впливає стан карбідного скелета на фізико-механічні та експлуатаційні властивості сплавів, що розглядаються. Теоретичні, тобто отримані за допомогою комп'ютерних розрахунків, (над ризикою) і експериментальні (під ризикою) значення деяких з них розміщено в табл. 2. При цьому густину ρ , твердість HRA, границю міцності при випробуванні на згин R_{bm} вимірювали за методиками ГОСТ 20019-74. Коерцитивну силу H_{cm} визначали коерцитиметром ИКС-96М за ГОСТ 24916-81, міцність при випробуванні на стискання R_{cm} – за допомогою універсальної тестової машини УТС-100 за ГОСТ 27034-86, коефіцієнт інтенсивності напружень K_{JC} – за ГОСТ 25.506-85. Слід зазначити, що для сплавів ВК8 при всіх режимах спікання отримані середні значення R_{bm} та R_{cm} перебувають у досить широких 95%-х довірчих інтервалах.

Границі міцності, що містяться у графах 7–9 табл. 2, розраховують за виразами, що наведені в [3]. Теоретичні ж значення коерцитивної сили, твердості та тріщиностійкості (графи 5, 6, 10 табл. 2) – згідно з [4].

Як свідчать результати аналізу даних табл. 2, розрахункові значення досить добре узгоджуються з експериментальними, за винятком коерцитивної сили. Для H_{cm} різниця між теоретичними та вимірними значеннями становить 10–40%. Максимальна ж похибка апроксимації для H_{cm} становить 5,5%. Оскільки H_{cm} істотно залежить від густини, то можна припустити, що вимірне значення густини дещо занижене. Потрібно також зважати на те, що на границях зерен WC містяться легуючі елементи, а математичні моделі побудовані для двофазних технічних твердих сплавів групи ВК.

Таблиця 2. Фізико–механічні властивості твердих сплавів

Сплав	$T_{сп}$, °C	d_{WC} , мкм	ρ , г/см ³	$H_{см}$, КА/м	HRA , ГПа	$R_{см}$, ГПа	$R_{тм}$, ГПа	R_{bm} , ГПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BK8 вихідний	1450	2,1	14,7	$\frac{8,7}{9,6}$	$\frac{89,5}{89,0}$	5,0	1,0	$\frac{2,2}{1,9}$	13,2
	1470	2,8	14,7	$\frac{7,5}{8,6}$	$\frac{89,0}{87,3}$	4,6	1,1	$\frac{2,2}{1,7}$	14,8
BK8+0,05% VC	1450	1,7	14,7	$\frac{9,8}{11,0}$	$\frac{89,8}{89,5}$	5,2	1,0	$\frac{2,1}{2,0}$	12,2
	1470	2,2	14,8	$\frac{8,5}{10,9}$	$\frac{89,4}{89,5}$	4,9	1,1	$\frac{2,2}{2,2}$	13,5
	1500	2,3	14,8	$\frac{8,5}{9,8}$	$\frac{89,3}{89,0}$	4,9	1,1	$\frac{2,2}{1,9}$	13,8
BK8+0,05% TaC	1450	1,7	14,9	$\frac{10,4}{12,3}$	$\frac{89,8}{89,7}$	5,3	1,1	$\frac{2,2}{1,6}$	12,3
	1470	2,1	14,9	$\frac{8,9}{12,0}$	$\frac{89,4}{89,5}$	4,9	1,1	$\frac{2,2}{2,0}$	13,4
	1500	2,6	14,9	$\frac{7,4}{11,0}$	$\frac{89,0}{89,2}$	4,6	1,1	$\frac{2,1}{1,7}$	14,7
BK8+0,1% TaC	1450	1,7	15,0	$\frac{10,8}{12,7}$	$\frac{90,0}{90,4}$	5,4	1,2	$\frac{2,2}{1,5}$	12,3
	1470	2,1	14,9	$\frac{9,1}{11,9}$	$\frac{89,5}{89,7}$	5,0	1,1	$\frac{2,2}{1,9}$	13,2
	1500	2,4	14,9	$\frac{8,4}{11,5}$	$\frac{89,2}{89,1}$	4,8	1,1	$\frac{2,2}{1,6}$	14,0
BK8 серійний	1450	2,4	14,7	$\frac{8,0}{9,8}$	$\frac{89,2}{89,0}$	$\frac{4,8}{4,0}$	1,1	$\frac{2,1}{2,0}$	$\frac{13,9}{13,6}$

Висновки

За допомогою розробленої комп'ютерної програми можна проводити аналіз зв'язку мікроструктурних параметрів з фізико-механічними властивостями сучасних твердих сплавів WC–Co у широкому діапазоні вмісту кобальтової зв'язки (3–30% мас.) і розмірів карбідних зерен (0,1–20 мкм).

Необхідні вхідні дані для запропонованої програми: масова концентрація кобальту у сплаві WC–Co залежно від марки сплаву та розподіл карбідних зерен WC за розмірами, який визначають відповідно до ГОСТ 9391-80 металографічним методом.

У результаті виконання програми розраховують:

- об'ємний вміст кобальту у сплаві v ;
- густину сплаву ρ (г/см³);
- середній розмір карбідних зерен d_{WC} (мкм);
- коефіцієнт варіації розмірів зерен WC в сплаві, V ;
- коефіцієнт суміжності карбідної фази C ;
- середній розмір кобальтових прошарків l_{Co} (мкм);
- питому площу міжзеренної $S_{WC/WC}$ (мкм⁻¹) та міжфазної $S_{WC/Co}$ (мкм⁻¹) поверхні;
- об'ємний модуль пружності сплаву K , (ГПа);
- модуль зсуву сплаву μ (ГПа);
- модуль Юнга сплаву E (ГПа);

- коефіцієнт Пуассона сплаву ν ;
- коефіцієнт теплового розширення сплаву α (K^{-1});
- залишкові термічні напруження в кобальтовій σ_{Co} (ГПа) і в карбідній σ_{WC} (ГПа) фазах;
- границю міцності при випробовуванні на стискання R_{cm} (ГПа), розтягування R_{tm} (ГПа), згинання R_{bm} (ГПа);
- твердість за Віккерсом HB30 (ГПа) та за Роквеллом HRA (ГПа);
- в'язкість руйнування K_{IC} (МПа·м^{1/2});
- коерцитивну силу H_{cm} (кА/м);
- питоме магнітне насичення σ_S (Гс·см³/г).

Розроблений програмний продукт можна використовувати як ефективний засіб для контролю точності вимірювання фізико-механічних та експлуатаційних властивостей промислових марок твердих сплавів, а також при розробленні нових матеріалів.

Освещены возможности использования компьютерной программы для прогнозирования физико-механических и эксплуатационных свойств твердых сплавов WC–Co в широком диапазоне размеров зерен WC и содержания связующей фазы.

Ключевые слова: *твердый сплав WC–Co, структурные параметры, физико-механические и эксплуатационные свойства, компьютерная программа.*

POSSIBILITIES OF FORECASTING PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID ALLOYS WC-CO BY DISTRIBUTION OF DOUBLE GRADE DIMENSIONS

Using a computer program to predict physical, mechanical and performance properties for carbide WC–Co in a wide range of grain size WC and concentration of cobalt.

Key words: *hardmetals WC–Co, structural parameters, physical, mechanical and performance properties, computer program.*

Література

1. Golovchan V. T., Litoshenko N. V. On the contiguity of carbide phase in WC–Co hardmetals // Int. J. Refr. Met. Hard Mater. – 2003. – 21. – P. 241–244.
2. Литошенко Н. В. Закономірність впливу залишкових термічних мікронапружень та дисперсії розмірів карбідних зерен на деформаційні характеристики твердих сплавів WC–Co: автореф. дис. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2002.
3. Golovchan V. T., Litoshenko N. V. The stress-strain behavior of WC-Co hardmetals // Comp. Mat. Sc. – 2010. – 49. – N 3. – P. 593–597.
4. Golovchan V. T. Some analytical consequences of experimental data of properties of WC–Co hardmetals // Int. J. Refr. Met. Hard Mater. – 2008. – 26. – P. 301–305.

Надійшла 12.06.17