

5. Kukla, C., Slemenik P., L., Bek, M. et al. (2018). Influence of filler types onto the viscosity of highly filled polymers. Proceedings from International Conference on Polymers and Moulds Innovations'18, 8, 120.
6. Tretyakov V.I. (1976). *Osnovy metallovedeniia i tekhnologii proizvodstva spechennykh tverdyykh splavov* [Fundamentals of metal science and technology for the production of sintered hard alloys]. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
7. Aksenov G.I. (1962). *Osnovy poroshkovoy metallurgii* [Fundamentals of Powder Metallurgy]. – Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatelstvo [in Russian].
8. Kim V. S., & Skachkov V. V. (1988). Disperhirovaniye i smesheniye v protsessakh proizvodstva i pererabotki plastmass [Dispersion and mixing in the processes of production and processing of plastics]. Moscow: Khimiya [in Russian].

УДК 669.018.25.002.35

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-371-378

**Н.В. Литошенко, В.П. Ботвинко**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул.Автозаводська, 2, м. Київ, 04074; e-mail: tverdospлав@ism.kiev.ua*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛУ ЛЕГУЮЧИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ КРУПНОЗЕРНИСТОГО ТВЕРДОГО СПЛАВУ WC–20%Co**

*Завдання наукового дослідження полягає в тому, щоб встановити розподіл легуючих карбідів TaC і Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в крупнозернистому твердому сплаві WC–20% Co та оцінити вплив легування на мікроструктурні параметри (середній розмір карбідних зерен, коефіцієнт варіації розмірів зерен, коефіцієнт суміжності карбідної фази, середній розмір кобальтових проширків, питому площу міжзеренної і міжфазної поверхонь) та на фізико-механічні властивості (густина, твердість, границі міцності при випробуванні на стиск, розтяг, згин та тріщиностійкість) крупнозернистого твердого сплаву WC–20% Co.*

*Виготовлення нових легуваних твердих сплавів WC–20% Co, використовуваних для пар тертя і інструменту поліпшить їх експлуатаційні властивості.*

**Ключові слова:** *крупнозернистий твердий сплав WC–20%Co, легуючі добавки Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TaC, структурні параметри, фізико-механічні та експлуатаційні властивості.*

### **Вступ**

Проблемі підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей твердих сплавів в залежності від умов їхнього застосування за рахунок введення різних легуючих елементів присвячено багато робіт [1]. Огляд сучасних публікацій [1, 2] свідчить про те, що тверді сплави, леговані карбідами Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TaC, завдяки своїм властивостям знаходять все більше застосування для обробки матеріалів та для пар тертя.

Оскільки завдяки легуванню збільшується границя текучості кобальтової зв'язки, міцність міжфазних границь, якість міжкарбідних границь, удосконалюються форма і розмір зерен WC [3], то для посилення позитивного впливу легуючих карбідів необхідно проведення додаткових досліджень. Питання про механізм цього впливу до кінця не вивчене і на сьогодні залишається дискусійним. Дані про характер розподілу легуючих елементів в структурних складових твердих сплавах також є дуже суперечливими.

У зв'язку з цим метою роботи є дослідження розподілу легуючих карбідів TaC і Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в крупнозернистому твердому сплаві WC–20% Co та встановлення впливу легування на мікроструктурні параметри (середній розмір карбідних зерен, коефіцієнт варіації розмірів зерен, коефіцієнт суміжності карбідної фази, середній розмір кобальтових прошарків, а також питому площу міжзеренної і міжфазної поверхонь) та на фізико-механічні властивості (густина, твердість, границі міцності при випробуванні на стиск, розтяг та згин, тріщиностійкість) крупнозернистого твердого сплаву WC–20% Co.

### Методика експериментальних досліджень

Для дослідження характеру розподілу легуючих елементів в твердих сплавах WC–Co було обрано крупнозернистий сплав з вмістом кобальту 20% по масі. Це дозволило точніше оцінити вплив складу легуючих добавок на характер їх розподілу. Середня величина зерна карбіду вольфраму  $d_{WC}$  в досліджених сплавах становила близько 5 мкм, а середній розмір кобальтових прошарків –  $l_{Co}=2$  мкм, що полегшило експериментальну оцінку елементного складу цих прошарків.

Змішування твердосплавної суміші BK20KC із порошками карбідів Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і TaC проводили п'ятикратним протиранням через сито з розміром отвору у світлі 100 мкм. Замішування отриманих сумішей з розчином каучуку в бензині здійснювали вручну, використовуючи 150 мілілітрів 5%-го розчину на 1 кг суміші. Спресовані з отриманої суміші зразки після остаточного спікання мали розміри 5×5×35 мм. Спікання було проведено у дві стадії: нормалізуюче за температури 1000 °C і остаточне – за 1390 °C. Швидкість просування зразків у печі становила 5,5 мм/хв.

Для вивчення вмісту легуючих добавок у досліджуваних зразках використали растровий електронний мікроскоп BS34, укомплектований системою аналізу зображень і енергетичним аналізатором рентгенівських спектрів «Link 860». Похибка визначення домішки становила 0,1%. Вимірювали як інтегральний вміст домішки в зразку при різних (500, 1000, 2500, 5000, 10000 крат) збільшеннях, так і локальний: в кобальтовій фазі, на границях WC–WC та WC–Co.

Дослідження розподілу зерен WC за розмірами проводили на інвертованому оптичному мікроскопі «Axiovert 200MAT» фірми «Карл Цейсс». Зображення структури одержували за допомогою цифрової камери «AxioVisioCam HR» для шести довільно обраних полів із використанням об'єктива ×100 у режимі світлого поля. Для розрахунку розмірів зерен WC були використана програми AxioVisio Grains і Scion 4.

### Дослідження розподілу Cr і Ta в твердому сплаві BK20KC

За допомогою сканування на РЕМ мікроструктури сплавів з добавкою 0,25 і 0,8 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> інтегральним (×500) рентгеноспектральним аналізом було встановлено наявність у сплавах відповідно 0,3 і 0,6 % Cr (табл. 1). У той же час при скануванні з використанням всіх збільшень мікроструктури сплаву з добавкою 0,8 % TaC було виявлено досить нерівномірне розподілення танталу в структурі сплаву по досліджуваній поверхні. На окремих полях зору присутність танталу взагалі не було виявлено, на інших – його кількість досягала 1,8 %. Ці дані свідчать про те, що у випадку нерівномірного розподілу домішки в структурі сплаву для визначення її вмісту необхідно досліджувати велику кількість полів зору зразка при різних збільшеннях.

Таблиця 1. Елементний склад сплавів з 20 % по масі кобальту

Сплав	Вміст елементів, % (по масі)				
	W	C	Co	Cr	Ta
ВК20КС	72,46	7,78	19,76	—	—
ВК20КС + 0,25Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	71,95	7,80	19,97	0,28	—
ВК20КС + 0,8Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	71,77	7,82	19,83	0,58	—
ВК20КС + 0,8TaC	72,31	7,73	19,21	—	0,75*

Примітка: \* Визначено при збільшенні  $\times 10000$ .

На рис. 1 показано фрагменти мікроструктури твердих сплавів, де точками відзначені поля, у яких проводився локальний рентгеноспектральний аналіз. Результати аналізу наведено в табл. 2.

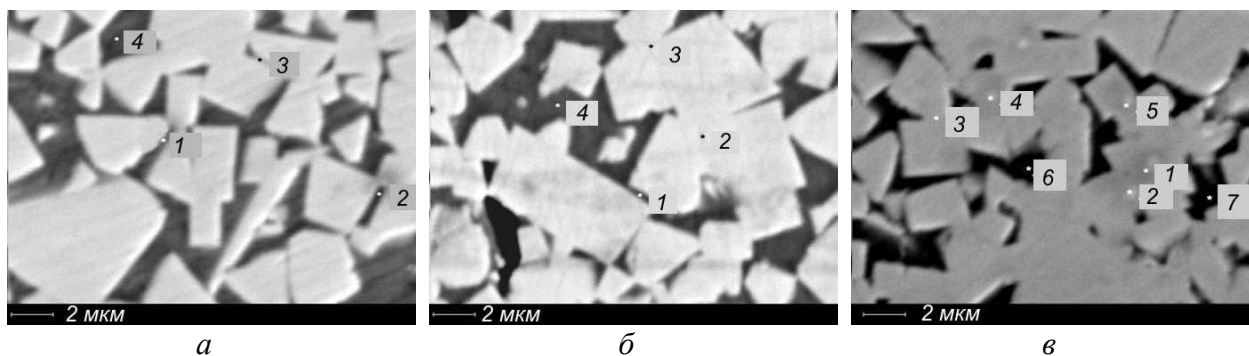


Рис. 1. Мікроструктура сплавів ВК20КС + 0,25Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (а), ВК20КС + 0,8Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (б), ВК20КС + 0,8TaC (в)

Таблиця 2. Хімічний склад сплавів в окремих місцях мікроструктури

Сплав	Вміст елементів, % (по масі)					№ точки на рисунку	Рисунок
	W	C	Co	Cr	Ta		
ВК20КС + 0,25Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	89,14	6,50	4,36	—	—	1	3, а
	48,86	9,55	41,19	0,40	—	2	
	91,77	6,30	1,93	—	—	3	
	21,15	11,67	66,44	0,74	—	4	
ВК20КС + 0,8Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	58,52	8,83	31,79	0,56	—	1	3, б
	90,20	6,73	2,72	0,35	—	2	
	93,07	6,14	0,79	—	—	3	
	21,88	11,63	64,64	1,85	—	4	
ВК20КС + 0,8TaC	38,9	7,1	1	—	53,0	1	3, в
	16,0	7,5	1,5	—	75,0	2	
	57,8	6,8	0,9	—	34,5	3	
	88,9	6,3	1,2	—	3,6	4	
	92,3	6,3	1,4	—	—	5	
	5,6	12,8	81,6	—	—	6	
	6,1	12,8	81,1	—	—	7	

Як видно з рис. 1 а, б і табл. 2, Cr практично весь розташовується в зв'язці, а Та, як правило, зосереджується по границях WC–WC і WC–Co (див. рис. 1 в). У кобальтовій фазі

Та не виявлено (див. рис.1 в, точки 6 і 7). В точці 3 танталу також не виявлено, хоча вона розташована на границі WC–WC. Вірогідно, ця границя утворена однаковими кристалографічними площинами зерен, в такому разі, за даними [4], танталу на ній не повинно бути.

### Вплив легуючих добавок на мікроструктуру і фізико-механічні властивості сплаву ВК20КС

На рис. 2 наведено гістограми розподілу зерен WC за розмірами у сплаві марки ВК20КС і сплавах на його основі з добавками 0,25 і 0,8 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і 0,8 % TaC.

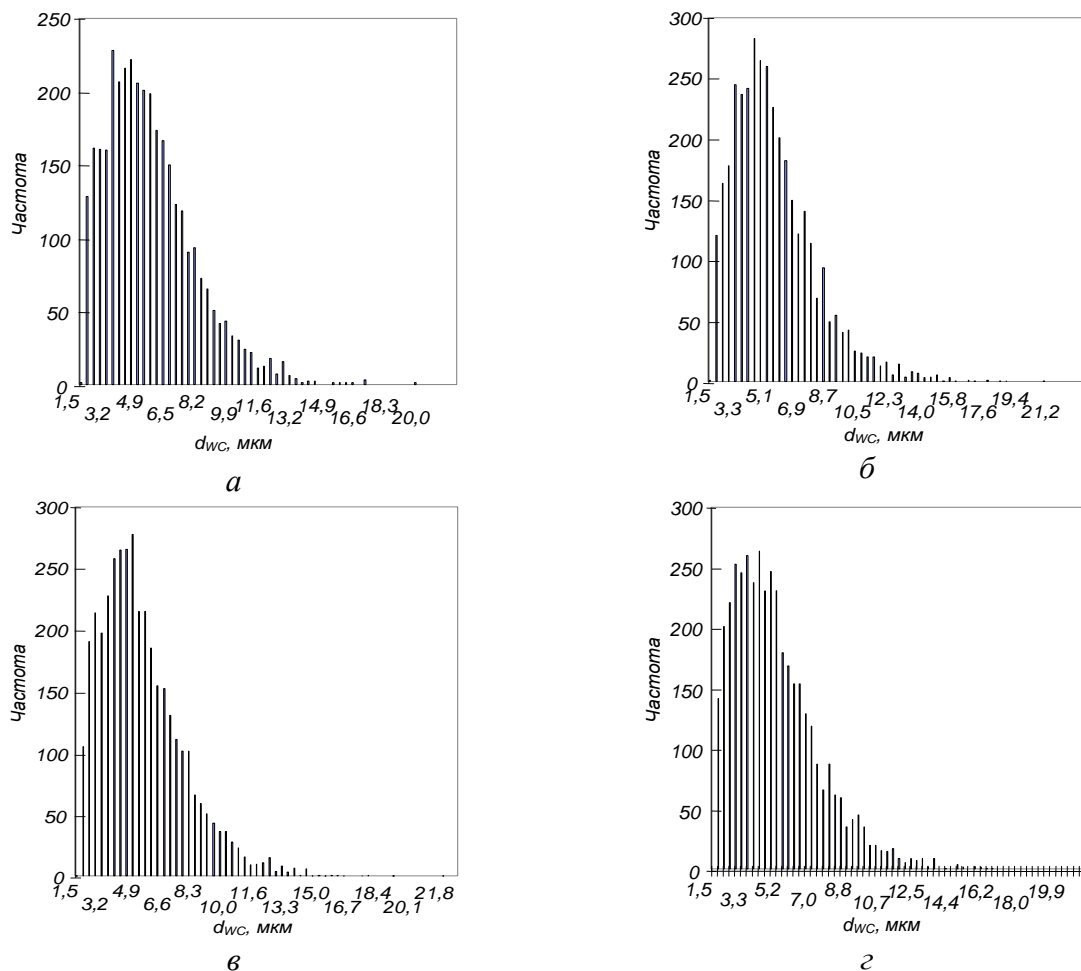


Рис. 2. Гістограма розподілу зерен WC за розмірами в сплаві ВК20КС (а) і в сплавах на його основі з добавками 0,25 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (б), 0,8 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (в), 0,8 % TaC (г)

Як видно з рис. 3, легування як карбідом хрому, так і карбідом танталу призводить до зменшення  $d_{WC}$ , причому дещо більший ефект має місце при легуванні карбідом TaC. При цьому ступінь зменшення середнього розміру зерен WC не перевищує 6%. Ці результати свідчать про те, що гіпотеза [5] про подрібнення елементів структурних складових сплавів, легованих хромом і танталом, справедлива і для крупнозернистого сплаву марки ВК20КС.

Виконаними дослідженнями підтверджено факти розчинення хрому в зв'язці і відсутність його на границях WC–WC і WC–Co. Танталу у кобальті не знайдено, бо він сегрегує по границях WC–Co і WC–WC. Таким чином, тантал при додаванні його у тверді сплави може істотно впливати на їхні механічні властивості за рахунок як зменшення розміру карбідних зерен, так і зміни стану міжфазних і міжзеренних границь. Якщо взяти до уваги, що присутність на границях WC–WC цих сплавів кобальту й танталу обумовлює зростання роботи руйнування границь, підвищуючи тим самим їхню міцність, можна очікувати, що

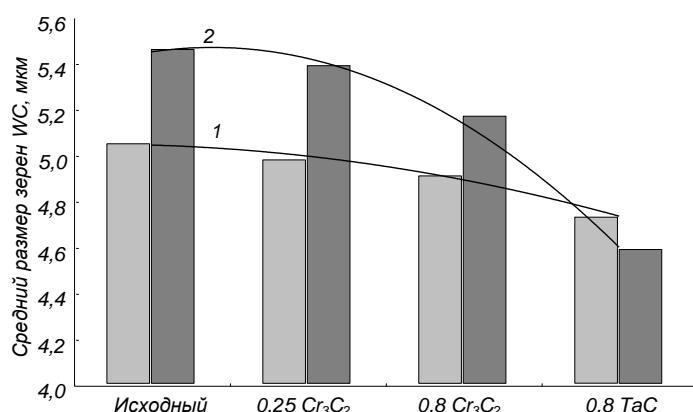


Рис. 3. Діаграма середнього розміру зерна WC в сплаві BK20KC при введенні в нього добавок карбідів хрому і танталу 1 – Ajio-Visio Grains; 2 – Scion 4

добавка танталу до твердого сплаву призведе до підвищення міцності і довговічності конструкційних елементів з таких сплавів. На відміну від танталу, хром не змінює властивостей границь WC–WC. Але його присутність у зв'язці буде зміцнювати її і завдяки цьому сприяти підвищенню деяких фізико-механічних характеристик сплаву.

Використовуючи розроблену комп'ютерну програму [6], проведемо аналіз зв'язку мікроструктурних параметрів з фізико-механічними властивостями твердих сплавів, що розглядаються. Необхідними вхідними даними для запропонованої програми є масова концентрація кобальту у сплаві та розподіл карбідних зерен WC за розмірами, який визначають відповідно до ГОСТ 9391-80 металографічним методом.

За допомогою формул лінійного аналізу та виразу для визначення коефіцієнта суміжності карбідних зерен сплавів WC–Co [7] визначимо 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 питому площу міжзеренної поверхні  $S_{WC/WC}$  і міжфазної –  $S_{WC/Co}$ . Значення наведених характеристик для досліджуваних сплавів розміщено в табл. 3.

Таблиця 3. Мікроструктурні параметри твердих сплавів BK20KC

Сплав	WC, %						$d_{WC}$ , мкм	$l_{Co}$ , мкм	$V$	$C$	$S_{WC/WC}$ , мкм <sup>-1</sup>	$S_{WC/Co}$ , мкм <sup>-1</sup>
	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
BK20KC вихідний	5	10	11	24	29	21	5,44	4,3	0,45	0,44	0,11	0,28
BK20KC+0,25% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	6	12	10	28	24	20	5,22	4,1	0,48	0,44	0,12	0,30
BK20KC+0,8% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	7	12	13	25	23	20	5,12	4,0	0,50	0,43	0,12	0,31
BK20KC+0,8% TaC	10	21	13	20	17	20	4,71	3,5	0,58	0,42	0,12	0,35

Як видно з табл. 3, середній розмір зерен WC найсуттєвіше зменшився в порівнянні з вихідним в сплаві BK20KC+0,8%TaC (на 13%). Мікроструктура сплаву BK20KC+0,8%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> має більші значення коефіцієнта варіації зерен WC за розмірами, ніж у BK20KC+0,8%TaC,

але менші значення коефіцієнта варіації зерен WC за розмірами, ніж у вихідного BK20KC. Площа міжфазної поверхні для сплаву, легованого 0,8%TaC, збільшилась на 10% в порівнянні з BK20KC.

З'ясуємо, як впливають такі зміни мікроструктури 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. 4. При цьому густину  $\rho$ , твердість  $HRA$  та границю міцності при випробовуванні на згин  $R_{bm}$  вимірювали за методиками ГОСТ 20019-74. Границі міцності, що містяться у графах 6–8 табл. 4, розраховують за виразами, що наведені в [8]. Теоретичні ж значення коерцитивної сили, твердості та тріщиностійкості (графи 4, 5, 9 табл. 4) отримують згідно з [9].

Таблиця 4. Фізико–механічні властивості твердих сплавів BK20KC

Сплав	$d_{WC}$ , мкм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$H_{cm}$ , кА/м	$HRA$ , ГПа	$R_{cm}$ , ГПа	$R_{lm}$ , ГПа	$R_{bm}$ , ГПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
BK20KC вихідний	5,44	$\frac{13,59}{13,45}$	5,40	$\frac{85,06}{83,70}$	3,16	1,18	$\frac{2,12}{2,00}$	35,71
BK20KC+0,25% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5,22	$\frac{13,60}{13,37}$	5,56	$\frac{85,10}{83,70}$	3,19	1,18	$\frac{2,14}{1,99}$	34,62
BK20KC+0,8% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5,12	$\frac{13,59}{13,29}$	5,65	$\frac{85,16}{83,90}$	3,20	1,18	$\frac{2,15}{1,93}$	34,08
BK20KC+0,8% TaC	4,71	$\frac{13,59}{13,41}$	6,06	$\frac{85,29}{83,80}$	3,27	1,19	$\frac{2,19}{1,94}$	31,97

Як свідчать дані табл. 4, найбільше зросла твердість і границя міцності при стисканні сплаву, легованого добавкою 0,8% TaC. При цьому його тріщиностійкість зменшилась на 15%. Загалом розрахункові значення досить добре узгоджуються з експериментальними, якщо зважати на те, що на границях зерен WC містяться легуючі елементи, а математичні моделі побудовані для двофазних композитів WC–Co.

### Висновки

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що тантал зосереджується на границях WC–WC і WC–Co, змінюючи їхній стан з покращенням експлуатаційних властивостей сплаву BK20KC+0,8% TaC. На відміну від танталу, хром знаходиться у кобальтовій зв'язці і не впливає на стан границь. Легування мікродобавками (до 0,8%) карбідів Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і TaC при спіканні вольфрамових твердих сплавів призводять до зменшення середнього розміру зерна WC у крупнозернистих багатокобальтових сплавах.

За допомогою математичного моделювання встановлено, що додавання 0,8%TaC призвело до зменшення  $d_{WC}$  на 13% та збільшення коефіцієнта варіації зерен WC за розмірами від 0,45 до 0,58. Площа міжфазної поверхні для сплаву, легованого 0,8% TaC, збільшилась на 10% в порівнянні з BK20KC. Що стосується властивостей сплаву BK20KC+0,8% TaC, то його твердість і границя міцності при стисканні незначно зросли, а тріщиностійкість зменшилась на 15%. Мікроструктурні параметри та фізико-механічні властивості сплаву BK20KC+0,8% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> практично не відрізняються від таких у вихідному сплаві.

**N.V. Lytoshenko, V.P. Botvinko**

*V. N. Bakul Institute for Superhard materials National Academy of Sciences of Ukraine*

### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DISTRIBUTION OF ALLOY ADDITIVES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COARSE-GRAIN HARD ALLOY WC–20%Co**

*The objective of the research is to determine the distribution of alloying carbides TaC and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> in coarse-grained hard alloy WC–20% Co and to evaluate the effect of alloying on microstructural parameters (average carbide grain size, grain size variation coefficient, carbide phase adjacency coefficient, average layers, the specific area of intergranular and interfacial surfaces) and the physical and mechanical properties (density, hardness, yield strength in the test for compression, tensile, bending and crack resistance) of coarse-grained hard alloy WC–20% Co.*

*The production of new alloyed hard alloys WC–20% Co used for friction pairs and tools will improve their performance properties.*

**Key words:** *coarse-grained hard alloy WC–20% Co, alloying additives Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TaC, structural parameters, physical-mechanical and operational properties.*

**Н.В. Литошенко, В.П. Ботвинко**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КРУПНОЗЕРНИСТОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА WC–20% Co**

*Задача научного исследования заключается в том, чтобы установить распределение легирующих карбидов TaC и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в крупнозернистом твердом сплаве WC–20%Co и оценить влияние легирования на микроструктурные параметры (средний размер карбидных зерен, коэффициент вариации размеров зерен, коэффициент смежности карбидной фазы, средний размер кобальтовых прослоек, удельную площадь межзеренной и межфазной поверхностей) и на физико-механические свойства (плотность, твердость, предел прочности при сжатии, растяжении, изгибе, и трещиностойкость) крупнозернистого твердого сплава WC–20% Co.*

*Изготовление новых легированных твердых сплавов WC–20% Co, используемых для пар трения и инструмента улучшит их эксплуатационные свойства.*

**Ключевые слова:** *крупнозернистый твердый сплав WC–20%Co, легирующие добавки Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TaC, структурные параметры, физико-механические и эксплуатационные свойства.*

#### **Література**

1. Панов В.С., Зайцев А.А. Твердые сплавы WC–Co, легированные карбидом тантала. Обзор //Тугоплавкие, керамические и композиционные материалы. – 2015. –№ 2. – С. 44–48.
2. Ботвинко В.П. Вплив легуючих мікро добавок VC, TaC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> на структуру та фізико-механічні властивості твердого сплаву ВН20 // Породорозрушаючий і металлообробляючий інструмент – техніка і технологія його виготовлення і застосування. Сб. науч. тр. – Выпуск 22. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2019. –С. 390–396.
3. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСИС, 2004. – 464 с.
4. Бондаренко В.П., Павлоцкая Э.Г. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно контролируемой газовой среде. – К.: Наукова думка, 1995. – 204 с.
5. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.И. Карбиды вольфрама. – К.: Наукова думка, 1974. – 176 с.

6. Бондаренко В.П., Литошенко Н.В., Ботвінко В.П. Возможности прогнозирования физико-механических vlastivostey твердых сплавів WC–Co за розподілом розмірів карбідних зерен // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. – Выпуск 20. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2017. – С. 395–398.
7. Golovchan V.T., Litoshenko N.V. On the contiguity of carbide phase in WC–Co hardmetals // Int. J. Refr. Met. Hard Mater. – 2003. – V. 21. – P. 241–244.
8. Golovchan V.T., Litoshenko N.V. The stress-strain behavior of WC-Co hardmetals // Comp. Mat. Sc. – 2010. – V. 49, N 3. – P. 593–597.
9. Golovchan V.T. Some analytical consequences of experimental data of properties of WC–Co hardmetals // Int. J. Refr. Met. Hard Mater. – 2008. – V. 26. – P. 301–305.

Надійшла 10.06.21

### References

1. Panov V. S., Zaitsev A.A. (2004). *Tverdye splavy WC–Co lehirovanye karbidom tantala [Tantalum carbide alloyed WC–Co hard alloys]*. Moscow: MISIS [in Russian].
2. Botvinko V. P. (2019). Vplyv lehuyuchykh mikro dobavok VC, TaS, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> na strukturu ta fizyko-mekhanichni vlastyvoli tverdoho splavu VN20 [Injection of lightweight micro-additives VC, TaC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> on the structure and physical-mechanical properties of the hard alloy WC–20%Ni] *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 22, 390–396 [in Ukrainian].
3. Panov, V. S., Chuvilin, A.M., Falkovsky, V.A. (2004) *Technologiya spechennykh tverdikh splavov i izdelii iz nikh [Technology and properties of sintered hard alloys and their products]*. Moscow: MISIS [in Russian].
4. Bondarenko V.P., Pavlotskaia E.G. (1995). *Spekanie volframovykh tverdikh cplavov v pretsizionno kontroliruemoi hazovoi srede [Sintering of tungsten hard alloys in a precision controlled atmosphere]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
5. Samsonov, G.V., Vitryanyuk, V.K., & Chaplygin, F.I. (1974). *Karbidy volframa [Tungsten carbides]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
6. Bondarenko V.P., Litoshenko N.V, Botvinko V. P. (2017). Mozhyvosti prohnozuvannia fizyko-mekhanichnykh vlastyvolei tverdikh splaviv WC–So za rozpodilom rozmiriv karbidnykh zeren [Possibilities of forecasting physical and mechanical properties of WC–Co hard alloys by size distribution of carbide grains]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 20, 395–398 [in Ukrainian].
7. Golovchan, V.T., & Litoshenko, N.V. (2003). On the contiguity of carbide phase in WC–Co hardmetals. *Int. J. Refr. Met. Hard Mater.*, 21, 241–244.
8. Golovchan, V.T., Litoshenko, N.V. (2010). The stress-strain behavior of WC–Co hardmetals. *Comp. Mat. Sc.*, 49, 3, 593–597.
9. Golovchan, V.T. (2008). Some analytical consequences of experimental data of properties of WC–Co hardmetals. *Int. J. Refr. Met. Hard Mater.*, 26, 301–305.