

- металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С. 465–470.
2. Кухаренко С. А. Повышение адгезии в системе стеклопокрытие – органическая связка // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2011. – № 14. – С. 520–524.
  3. Шило А. Е. Стеклопокрытия для порошков сверхтвердых материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 208 с.
  4. Пайка и металлизация сверхтвердых инструментальных материалов / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко, И. А. Лавриненко, Я. Ф. Моцак. – К.: Наук. думка, 1977. – 187 с.
  5. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов / Е. М. Чистяков, А. А. Шепелев, Т. М. Дуда и др. – К.: Наук. думка, 1982. – 201 с.
  6. Физико-химические свойства окислов / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с.
  7. Особенности электрохимического осаждения тугоплавких сплавов на алмазах / Т. М. Дуда, С. А. Кухаренко, В. В. Шатохин, А. Г. Довгань // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2010. – № 13. – С. 470–476.
  8. Дуда Т. М. Металлизированные никелем, медью и титаном алмазные и кубонитовые шлиф- и микропорошки // Инструмент. світ. – 1999. – № 4–5. – С. 28–29.

Поступила 22.03.12

УДК 669.018.025

**В. П. Бондаренко**, член-корр. НАН Украины, **Н. А. Юрчук**, канд. техн. наук.,  
**И. А. Гнатенко**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ТВЕРДОГО СПЛАВА VK15, СПЕЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ**

*Приведены результаты определения структурных параметров образцов твердого сплава VK15, спеченного в условиях одноосного растяжения.*

**Ключевые слова:** *твердый сплав, одноосное растяжение, структура, стереометрические параметры.*

Структурные параметры спеченных твердых сплавов обычно оценивают по методикам, изложенным в [1–3]. Методика ускоренных компьютеризированных расчетов стереометрических характеристик структуры среднезернистых спеченных твердых сплавов приведена в [4]. Особенность этой методики состоит в использовании эмпирического уравнения, описывающего зависимость коэффициента смежности  $C$  карбидных зерен твердого сплава от объемной доли связки в нем  $V_{Co}$  и коэффициента вариации  $Var$  карбидных зерен по размерам:

$$C = 1 - 0,652(1 + 2,574Var)V_{Co}^{0,783} \quad (1)$$

Уравнение (1) было получено в результате обработки многочисленных опубликованных в зарубежной литературе экспериментальных данных о характеристиках структуры спеченных среднезернистых твердых сплавов. Объемное содержания  $Co$  связки

$V_{Co}$  в этом уравнении предлагалось рассчитывать исходя из содержания связки, указанного в обозначении стандартной марки сплава, по формуле

$$V_{Co} = \frac{c\rho_{WC}}{(1-c)\rho_{Co} + c\rho_{WC}}, \quad (2)$$

где  $c$  – содержание связки, указанное в обозначении марки твердого сплава;  $\rho_{WC}$  – плотность карбида вольфрама;  $\rho_{Co}$  – плотность кобальта.

Исходя из уравнения (2),  $V_{Co}$  в рамках одной марки сплава является величиной постоянной, т. е.  $V_{Co} = \text{const}$ , и не может влиять на коэффициент смежности карбидных зерен, хотя по технологии допускается колебание  $V_{Co}$  в пределах  $\pm 0,5\%$ .

Практическое опробование этой методики для оценки стереометрических характеристик стандартных спеченных среднезернистых твердых сплавов группы ВК (ВК6 – ВК20) подтвердило ее высокую эффективность. Эту методику до сих пор успешно используют в металлографических исследованиях твердых сплавов в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Однако в случае выхода за пределы аппроксимации (содержание связки более 20% (масс.); спекание твердых сплавов в условиях, отличающихся от свободного спекания) применение этой методики для оценки структурных параметров твердых сплавов приводило к значительным отклонениям. Оценка структурных параметров твердых сплавов, спеченных в условиях заневоливания усадки [5–7], сплавов с повышенным содержанием связки (ВН25, ВК32, ВК50, ВК65), а также при спекании образцов с приложением к образцу растягивающих сил [8] не позволяла обнаружить наблюдающиеся под микроскопом изменения структуры, а в ряде случаев полученные по этой методике расчетные стереометрические характеристики структуры имели отрицательные значения, что в принципе невозможно. Эти результаты указывали на то, что при исследовании образцов, спеченных в специфических условиях или имеющих размеры и содержание структурных составляющих, отличные от условий аппроксимации, необходимо использовать более универсальные методики, приведенные в [1].

Кроме того, в [9; 10] показано, что для более полного описания структуры спеченных твердых сплавов необходимо количественно оценивать также другие структурные параметры (доли типов контактов WC–WC, удельную площадь контактов разных типов), оценка которых в указанной методике не предусмотрена.

Более полный учет параметров структуры особенно важен для образцов, спеченных в условиях одноосного растяжения, так как в процессе такого спекания происходит неоднородная деформация разных частей образца: однородное удлинение цилиндрической части и образование шейки [8]. В соответствии с [11–13] в участках образца с различной степенью деформации возможно также различное состояние структуры.

В этой связи цель настоящей работы – количественно оценить состояние структуры образцов твердого сплава ВК15, спеченных в условиях одноосного растяжения, при наиболее полном учете параметров их структуры.

#### **Методика исследований**

Исследовали образцы, изготовленные из смеси твердого сплава WC –15% Co специальной формы в виде гантелей, которые спекали в вакуумной печи при температуре 1350 °C и внешнем растягивающем напряжении 1,03 МПа. При таком напряжении образец после значительного удлинения с образованием шейки [8] разрушался.

На оптическом микроскопе МИМ-10 с помощью цифровой камеры-окуляра при увеличении  $\times 1000$  были получены фотографии микроструктур сплава в двух характерных точках образца (рис. 1): около места разрыва образца (точка А) и места его крепления в зажимах (точка Б).



Рис. 1. Внешний вид образца после спекания в условиях одноосного растяжения: крестиками отмечены места фотографирования структуры

По фотографиям микроструктур линейным методом анализа [1; 9] определили стереометрические характеристики сплава и проанализировали полученные результаты.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Полученные фотографии структуры и результаты их обработки по методикам, приведенным в [1], показаны на рис. 2 и описаны в таблице.

Как видим, даже по фотографиям нетравленного шлифа (рис. 2 (а, б)) можно констатировать большее объемное содержание Со-фазы в точке А. Такое различие в содержании фаз свидетельствует о том, что при приложении растягивающих нагрузок, как и предсказывалось в [12], фазовые составляющие в сплаве перераспределяются. Этот результат также свидетельствует о легкой трансформируемости карбидного скелета [9] и миграции жидкой фазы в растянутую зону в объеме образца в процессе вязко-пластического течения сплава в целом.

После травления образца реактивом Мураками в микроструктуре сплава описанная закономерность распределения фаз по длине образца также довольно хорошо прослеживается (рис. 2, в, г).

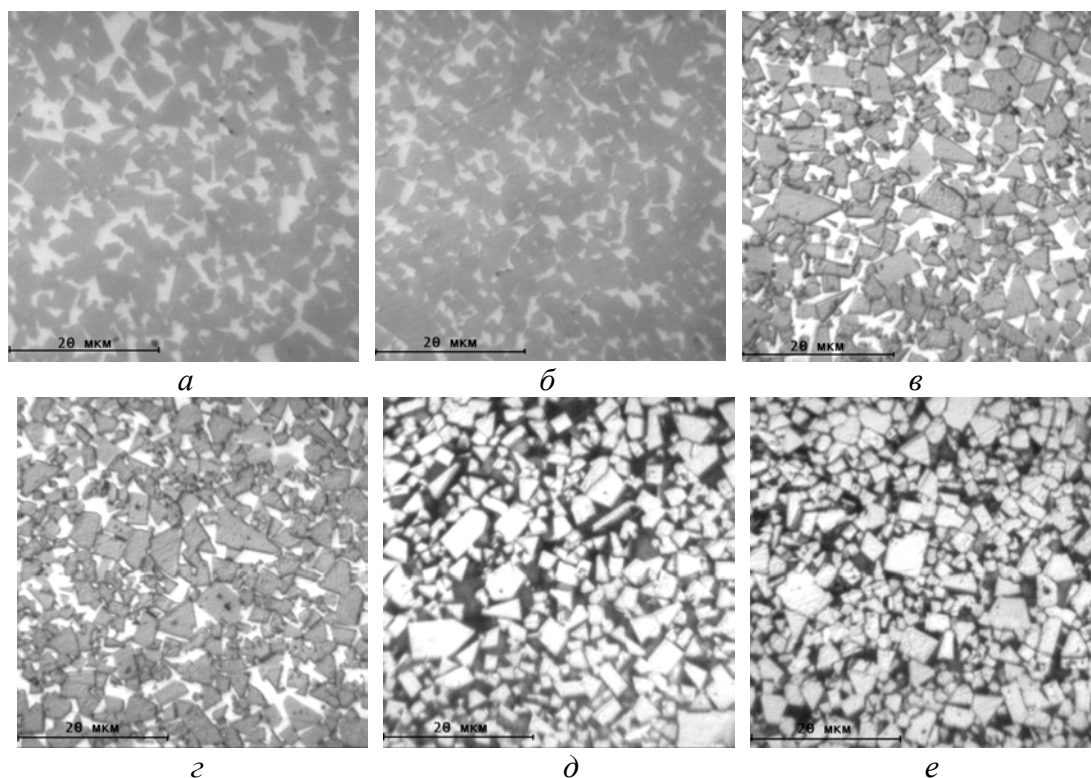


Рис. 2. Фотографии микроструктур твердого сплава ВК8 в точках А (а, в, д) и Б (б, г, е): нетравленные (а, б), травленные в течение 5 мин реактивом Мураками (в, г), травленные в течение 5 мин реактивом Мураками и 1 мин хлорным железом (д, е),  $\times 1000$ .

### Стереометрические характеристики твердого сплава ВК15

Характеристика сплава	Точка А (возле места разрыва)	Точка Б (возле места крепления)
$L_{Co}$ , мм (длина всех участков Co-фазы на суммарной длине секущих)	371	267
$L_{WC}$ , мм (длина всех участков фазы WC на суммарной длине секущих)	1105	1209
$N_{WC}$ (общее количество участков фазы WC, приходящихся на суммарную длину секущих)	182	209
$N_{Co}$ (общее количество участков Co-фазы, приходящихся на суммарную длину секущих)	116	101
$m_{WC-Co}$ (общее количество контактов WC-Co, приходящихся на суммарную длину секущих)	232	202
$m_{WC-WC(n)}$ (количество контактов WC-WC с близким к идеальному совпадению кристаллических решеток соприкасающихся плоскостей)	10	9
$m_{WC-WC(n)}$ (количество контактов WC-WC с неполным соответствием кристаллических решеток соприкасающихся плоскостей)	20	14
$m_{WC-WC(n)}$ (количество контактов WC-WC с полным несоответствием кристаллических решеток соприкасающихся плоскостей)	85	135
$m_{WC-WC(o)}$ (общее количество контактов WC-WC)	115	158
$V_{Co}$ , % (объемное содержание Co-фазы)	25,1	18,1
$V_{WC}$ , % (объемное содержание фазы WC)	74,9	81,9
$l_{Co}$ , мкм (средняя ширина Co прослойки)	1,2	0,9
$d_{WC}$ , мкм (средний размер зерен WC)	2,25	2,14
$S_{WC-Co}$ , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup> (удельная площадь контактной поверхности WC-Co), (% от общей площади поверхности границ)	464 (66,8%)	404 (56,1%)
$S_{WC-WC(n)}$ , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup> (удельная площадь контактной поверхности WC-WC с учетом типа контактов)	20 (2,9%)	18 (2,5%)
$S_{WC-WC(n)}$ , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	40 (5,8%)	28 (3,8%)
$S_{WC-WC(n)}$ , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	170 (24,5%)	270 (37,6%)
$S_{WC-WC(o)}$ , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup> (общая удельная площадь контактной поверхности WC-WC)	230 (33,2%)	316 (43,9%)
$C_{WC-WC(n)}$ (коэффициент смежности карбидных зерен с учетом определенного типа контактов- идеальных)	0,04	0,03
$C_{WC-WC(n)}$	0,09	0,05
$C_{WC-WC(n)}$	0,37	0,52
$C_{WC-WC(o)}$ (коэффициент смежности карбидных зерен с учетом всех типов контактов)	0,50	0,60

После такого травления можно четко определять такие характеристики твердого сплава, как количество контактов WC-WC разного типа, количество контактов WC-Co, средний размер карбидных зерен и среднюю толщину прослоек связующей фазы. При удалении связки хлорным железом (рис. 2, д, е) перераспределение связки по длине

заготовки становится менее выраженным, хотя большее содержание связки в точке возле места разрыва остается заметным.

С учетом последнего, исследования проводили только по первым двум типам фотографий, полученным для нетравленного шлифа (рис. 2, а, б) и травленного реактивом Мураками (рис. 2, в, г).

Методика и принцип определения параметров микроструктуры приведены в [9; 10], результаты – в таблице.

Из приведенных данных следует, что в точке Б содержится 18,1% об. Со, в точке А – 25,1% об. Средний размер зерна в обеих точках образца одинаковый и составляет 2,2 мкм. Количество контактов зерен WC–WC ( $m_{wc-wc}$ ) в точке А составляет 115, в точке Б – 158, т. е. в зоне увеличенной деформации общее количество контактов WC–WC уменьшилось на 27,2%.

Общая длина участков кобальта на суммарной длине секущих  $L_{Co}$  в точке А больше в 1,4 раза, что обусловлено увеличением ширины прослойки кобальта  $l_{Co}$  и количества участков Со-фазы  $N_{Co}$ , т. е. при трансформации скелета расширились бывшие прослойки и появились новые вследствие разрыва контактов с полным несоответствием  $m_{WC-WC(n)}$  и заполнения их кобальтом. Это подтверждается уменьшением количества контактов  $m_{WC-WC(n)}$  в точке А. Общая длина участков WC  $L_{WC}$  уменьшилась в 0,9 раза, т. е. длина участков WC в другой точке увеличилась только в 1,1 раза.

Количество участков кобальта  $N_{Co}$  возле места разрыва увеличилось в 1,15 раза, а участков WC  $N_{WC}$  уменьшилось и их доля составила 0,87 от количества участков  $N_{WC}$  в точке Б, т. е.  $N_{WC}$  в месте крепления образца увеличилось в 1,15 раза. Соотношение количества контактов WC–Со  $m_{WC-Co}$  в двух точках (232/202) составляет 1,15.

Смежность карбидных зерен также явно уменьшилась, что еще раз подтверждает уменьшение количества зерен и их контактов на определенной площади образца. Если рассматривать изменение различных видов контактов, наиболее чувствительны к приложению растягивающих нагрузок контакты, у которых наблюдается полное несоответствие кристаллических решеток соприкасающихся плоскостей: их количество уменьшилось на 37%.

#### **Выводы**

1. Показано, что применение статистического линейного метода анализа позволяет количественно подтвердить наблюдаемое визуально различие содержания фаз в точках возле места разрыва (точка А) и места крепления образца (точка Б).

2. Содержание связки возле места разрыва образца на 7% превышает ее содержание возле места крепления образца.

3. Показано, что приложение растягивающих напряжений при спекании приводит к изменению всех исследованных параметров структуры, а это, в свою очередь, свидетельствует о существенной трансформации карбидного скелета и перспективности использования растягивающих напряжений для управления состоянием карбидного скелета.

*Наведено результати визначення структурних параметрів зразків твердого сплаву BK15, спеченого в умовах одноосьового розтягування.*

**Ключові слова:** *твердий сплав, одноосьове розтягування, структура, стереометричні параметри.*

*The paper gives structural characteristics and values of the basic properties of WC-15Co cemented carbide in the form of rods sintered in vacuum under tensile stresses.*

**Key words:** *cemented carbide, under tensile stress, structure, stereometric characteristics.*

#### **Литература**

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 374 с.
2. Чапорова И. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1975. – 248 с.

3. Exner H. E. Physical and chemical nature of cemented carbides// Intern. Met. Rev. – 1979. – N 4. – P. 149–173.
4. Літошенко Н. В. Закономірності впливу залишкових термічних мікронапружень та дисперсії розмірів карбідних зерен на деформаційні характеристики твердих сплавів WC–Co: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 2002. – 24 с.
5. Особенности технологии изготовления и вопросы организации производства твердосплавных колец большого диаметра/ В. П. Бондаренко, К. И. Сирота, А. А. Яремчук и др. // Твердосплавная штамповая оснастка в электротехнической промышленности. – Таллин: Изд-во Эстонии ПТИ, 1975.– С. 42–43.
6. Артюхов В. П., Бондаренко В. П., Семенченко Н. И., Яремчук А. А. Изготовление твердосплавных колец больших диаметров с ограничением усадки при спекании // Технология изготовления твердосплавных изделий.– К.: ИСМ АН УССР, 1978. – С. 102–107.
7. Бондаренко В. П., Сотникова Л. Л., Юрчук Н. А. Некоторые свойства испеченных твердосплавных изделий в виде колец с разной величиной ограничения процесса усадки// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент: техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. - К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2007. – Вып. 10. – С. 400–406.
8. Юрчук Н. А. Влияние воздействия растягивающих напряжений на структуру и свойства спеченного в вакууме высококобальтового твердого сплава VK15 // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент: техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. - К.: Изд-Во ИСМ НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 374–381.
9. Перспективы управления процессом формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC-Co / В. П. Бондаренко, И. А. Гнатенко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14.– С. 423–437.
10. Удосконалений спосіб кількісної оцінки структури твердих сплавів// В. П. Бондаренко , І. О. Гнатенко , Л. М. Обушна / Тези доп. п'ятої конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування», 23-27 травня 2011р., с. Морське. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2011. – С. 13–17.
11. Начала феноменологии процесса формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC–Co. Сообщение 1./ В. П. Бондаренко , Н. А. Юрчук , Н. М. Прокопів и др.// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.– К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 13. – С. 375–381.
12. Начала феноменологии процесса формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC–Co. Сообщение 2./ В. П. Бондаренко , Н. А. Юрчук , Н. М. Прокопів и др.// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.– К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 13. – С. 381–384.
13. Начала феноменологии процесса формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC–Co Сообщение 3./ В. П. Бондаренко , Н. А. Юрчук , Н. М. Прокопів и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.– К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 13. – С. 384–389.

*Поступила 07.06. 12*