

## Использование ультрадисперсных порошковых добавок для получения твердосплавных рабочих элементов буровой техники Севера

М.В. Федоров\*, М.И. Васильева, Г.Г. Винокуров

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*

*\*fedorov.83@mail.ru*

**Аннотация.** В настоящее время рабочие элементы из твердых вольфрамокобальтовых сплавов широко применяются в буровой технике. Вместе с тем, свойственные твердым сплавам хрупкость и низкая пластичность часто приводят к недостаточной работоспособности рабочих элементов в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок буровой техники Севера (мерзлый грунт, горные породы и др.). Одним из способов улучшения структуры и свойств твердых сплавов является управление размерами зерна их карбидной фазы путем введения ингибиторов роста из ультрадисперсных порошков. Ультрадисперсные порошковые добавки, введенные в состав вольфрамокобальтовых сплавов, способствуют уменьшению размеров зерен карбида вольфрама в структуре сплава. Это приводит к улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств рабочих элементов буровой техники. В статье приведены результаты исследований по использованию ультрадисперсных порошковых добавок шпинели магния  $MgAl_2O_4$  и карбида кремния  $SiC$  для улучшения структурного состояния и физико-механических свойств вольфрамокобальтового сплава ВК8. Обоснованы и выбраны технологические операции подготовки порошковых смесей и изготовления буровых пластин с ультрадисперсными добавками. Исследованы физико-механические свойства и структура опытных буровых пластин. Для этого использованы традиционные методы исследований механических свойств в сочетании с металлографическим анализом. Результатами экспериментальных исследований показана перспективность использования ультрадисперсных порошковых добавок шпинели магния  $MgAl_2O_4$  и карбида кремния  $SiC$  для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств буровых пластин из вольфрамокобальтового сплава ВК8.

**Ключевые слова:** вольфрамокобальтовый сплав, буровые пластины, ультрадисперсные порошковые добавки, структура, размер зерна, механические испытания, физико-механические свойства.

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-123-130>

## The use of ultradispersed powder additives to obtain hard-alloy working elements of the drilling equipment of the North

M.V. Fedorov\*, M.I. Vasilyeva, G.G. Vinokurov

*Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*

*\*fedorov.83@mail.ru*

**Abstract.** Today, working elements of hard tungsten-cobalt alloys are widely used in drilling equipment. However, the friability and low plasticity of hard alloys often lead to insufficient working capacity of the working elements under conditions of intensive operational loads of the North drilling equipment (frozen soil, rocks, etc.). One of the ways to improve the structure and properties of hard alloys is to control the grain size of their carbide phase by injection growth inhibitors from ultradispersed powders. Ultradispersed powder additives introduced into tungsten-cobalt alloys, contribute to reducing the size of tungsten carbide grains in the alloy structure. This leads to the improvement of the physicomechanical and operational properties of the working elements of the drilling equipment. The paper presents the results of research on the use of ultrafine magnesium spinel powder  $MgAl_2O_4$  and silicon carbide  $SiC$  to improve the structural condition and physicomechanical properties of the VK8 tungsten-cobalt alloy. The technological operations for the preparation of powder

*mixtures and the manufacture of drilling plates with ultradispersed additives were reasonably and selected. The physicomaterial properties and structure of experimental drilling plates are investigated. For this purpose, traditional methods of studying mechanical properties added with metallographic analysis were used. The results of experimental studies show the potential use of ultradispersed magnesium spinel powder  $MgAl_2O_4$  and silicon carbide  $SiC$  additives to improve the physicomaterial and operational properties of drilling plates made of VK8 tungsten-cobalt alloy.*

**Key words:** tungsten-cobalt alloy, drilling plates, ultrafine powder additives, structure, grain size, mechanical tests, physical and mechanical properties.

### Введение

При изготовлении буровых вставок (рабочих элементов) бурового инструмента широко применяются металлокерамические или порошковые твердые сплавы ВК. Основным достоинством твердых сплавов инструментального назначения являются высокая износостойкость и твердость. Вместе с тем, свойственная им хрупкость и малая пластичность часто приводят к низкой работоспособности твердосплавных инструментов в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок. Недостаточная прочность твердых сплавов приводит к ограничению технологических режимов при обработке материалов и бурении. Так обеспечение надежности рабочих элементов буровой техники, работающей в экстремальных условиях Севера (мерзлый грунт, горные породы и др.), обуславливает повышенные требования к физико-механическим и эксплуатационным характеристикам твердосплавных материалов. При эксплуатации буровой техники Севера, вследствие интенсивного ударно-абразивного изнашивания твердосплавных рабочих элементов, часто возникает необходимость подбора марки твердого сплава для каждой технологической операции, обеспечивающей, прежде всего, минимально допустимую прочность в ущерб возможному повышению износостойкости. Существующие факторы снижения стойкости бурового инструмента определяют актуальность данного исследования [1–7]. Одним из перспективных способов улучшения структуры и свойств твердых сплавов является уменьшение размеров зерна их карбидной фазы путем введения ингибиторов роста.

Цель данной работы – разработка твердосплавных рабочих элементов с ультрадисперсными добавками шпинели магния  $MgAl_2O_4$  и карбида кремния  $SiC$  для буровой техники Севера.

### Материалы и методика

Объектом исследования являются опытные буровые пластины из вольфрамокобальтового твердого сплава с ультрадисперсными добавками, изучено изменение их микроструктуры и свойств в зависимости от содержания добавок. В качестве добавок в основной состав твердосплавного материала ВК8 при изготовлении буровых пластин

были введены ультрадисперсные порошки шпинели магния  $MgAl_2O_4$  и карбида кремния  $SiC$ .

Составы опытных образцов буровых пластин: №0 – исходный образец из ВК8 без ультрадисперсных добавок; №1 – ВК8+0,1% мас.  $MgAl_2O_4$ ; №2 – ВК8+0,3% мас.  $MgAl_2O_4$ ; №3 – ВК8+0,5% мас.  $MgAl_2O_4$ ; №4 – ВК8+0,8% мас.  $MgAl_2O_4$ ; №5 – ВК8+1,0% мас.  $MgAl_2O_4$ ; №6 – ВК8+ 0,1% мас.  $SiC$ ; №7 – ВК8+ 0,2% мас.  $SiC$ .

Механические испытания для определения физико-механических свойств опытных буровых пластин проведены в центральной заводской лаборатории ЗАО «ДВ - технология» (г. Комсомольск-на-Амуре). Определение предела прочности при поперечном изгибе проведено по ГОСТ 20019 на разрывной машине МР-500. Измерение твердости по Роквеллу (ГОСТ 20017) осуществлено на приборе Роквелла модели 2140TR с алмазным коническим наконечником. Плотности образцов установлены с использованием весов Т21-S (точность измерения 0,001); в качестве рабочей жидкости применялась дистиллированная вода. Определение пористости опытных образцов осуществлялось с помощью измерительного микроскопа УИМ-21 и установки для полировки образцов модели 3E881.

Аналитические исследования элементного состава, микроструктуры, микротвердости опытных образцов проведены по стандартным методикам:

- химический состав определен по данным спектрального анализа на спектрометрах «Spectroport-F» и «WAS Foundry-Master»;
- металлографические исследования проведены на оптических микроскопах «Neophot-32» и «Axio Observer D1m»;
- микротвердость фаз измерена с помощью прибора «ПМТ-3» по требованиям ГОСТ 9450-76 с нагрузкой на индентор 2 Н;
- пространственная структура поверхности опытных образцов исследовалась на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000C».

Обработка экспериментальных результатов проведена в программной среде MathCad и электронных таблицах Excel.

### Ультрадисперсные порошки и технология изготовления буровых пластин

Как показывает обзор литературных данных, на прочность и надежность твердосплавного инструмента влияет состав порошкового материала. Дело в том, что введение ультрадисперсных добавок как ингибиторов роста в состав вольфрамкобальтовых сплавов способствует уменьшению размеров зерен карбида вольфрама в структуре буровой пластины. Это в целом приводит к повышению износостойкости и срока эксплуатации рабочих элементов буровой техники.

В работе для разработки составов порошковых смесей сначала был проведен анализ ультрадисперсных порошков. Ультрадисперсный порошок шпинели  $MgAl_2O_4$  имеет основной химический состав с содержанием (в % мас.):  $MgO$  – 28,2;  $Al_2O_3$  – 71,8; также присутствуют примеси железа, хрома, цинка, марганца. Структурные характеристики ультрадисперсного порошка алюмомагниевого шпинели  $MgAl_2O_4$  (производства Института химии твердого тела и механохимии СО РАН) следующие: внешний вид – белый тонкодисперсный порошок, химический состав – по содержанию примесей соответствует марке «чистый»; микродеформации – 0,60 %; удельная поверхность – 72,43 м<sup>2</sup>/г; размер первичных частиц (кристаллитов) – 10,8 нм; плотность – 3,55 г/см<sup>3</sup>. Шпинель магния  $MgAl_2O_4$  устойчива по отношению к минеральным кислотам, расплавам щелочей, а также имеет достаточную механическую прочность, коррозионную и радиационную стойкость, хороший огнеупорный материал [8].

Карбид кремния (карборунд)  $SiC$  известен в двух модификациях, имеет слоистую структуру с гексагональной решеткой; компактные изделия из карбида кремния получают спеканием и горячим прессованием при высоких температурах. Из-за высокой твердости и тугоплавкости карбид кремния применяется как абразивный (для шлифовальных брусков, кругов), огнеупорный (футеровка печей, литейных машин), износостойкий (гидроциклоны, сопла для распыления абразивных пульп), электротехнический (нагреватели) материал; в электронике используется для изготовления вариаторов, выпрямительных полупроводниковых диодов и фотодиодов. Применение карбида кремния в различных материалах обусловлено их высокой износостойкостью, высоким сопротивлением окислению, химической стойкостью и термостойкостью [9–10].

Опытные буровые пластины с ультрадисперсными добавками изготовлены методами порошковой металлургии. Преимущество порошковой металлургии заключается в том, что существует возможность готовых изделий, не нуждающихся в обработке резанием. Технология изготовления

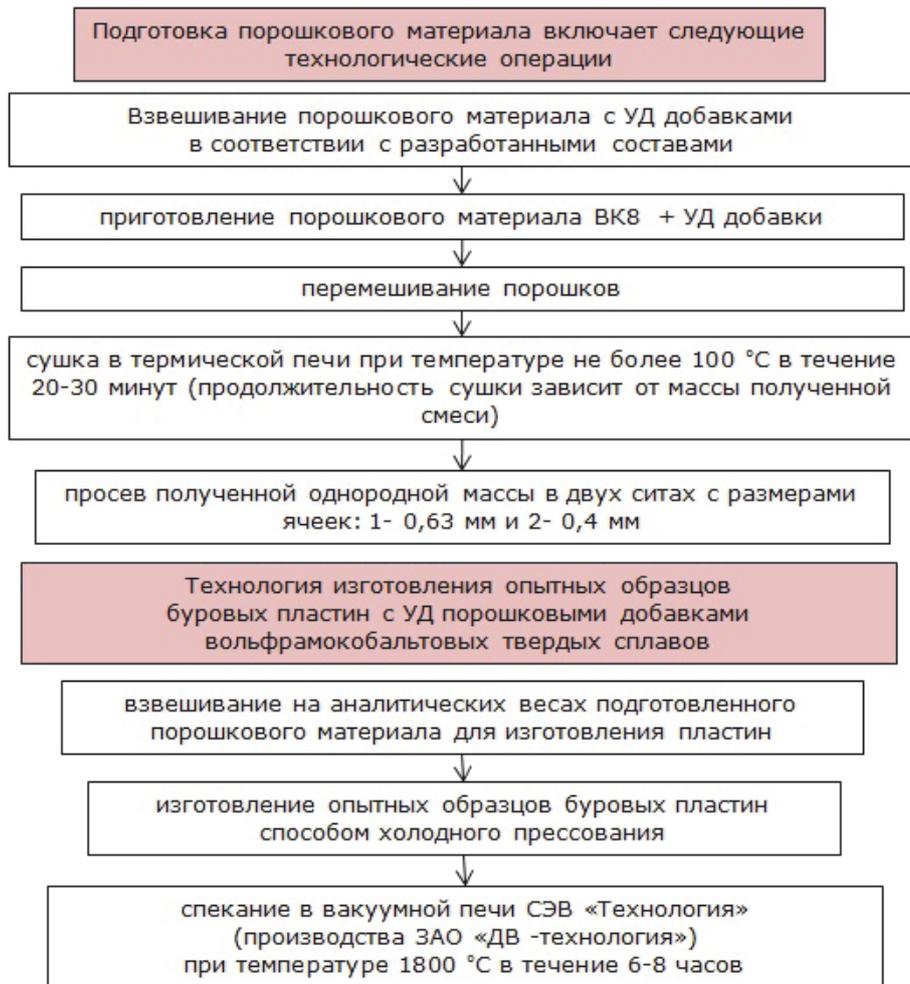
твердосплавных материалов способствует увеличению контакта между частицами, которые достигаются за счет деформации частиц внешними силами (прессованием). Известно, что с ростом контактной поверхности частиц повышаются прочность и связность порошкового металла [11].

В работе разработаны технологические операции изготовления опытных образцов твердосплавных буровых пластин с ультрадисперсными порошковыми добавками [12]. Блок-схема последовательности операций приведена на рис. 1. Согласно схеме, производство опытных твердосплавных пластин происходит в два этапа: 1) подготовка порошкового материала; 2) технология изготовления опытных образцов. Опытные образцы буровых пластин изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 4411-79 для твердых сплавов марок ВК6, ВК6-В, ВК8. Геометрические размеры совпадают с данными пластин рабочих элементов буровой техники. По разработанным составам опытные образцы буровых пластин с ультрадисперсными добавками были изготовлены в ЗАО «ДВ - технология» (г. Комсомольск-на-Амуре) (рис. 2).

### Результаты исследований

В работе для выявления неоднородности распределения элементов проведен химический анализ опытных образцов с ультрадисперсными добавками. Как ожидалось, основными элементами материала опытных образцов являются вольфрам и кобальт с равномерными распределениями. Содержание основного карбидообразующего элемента вольфрама  $W$  в контрольном составе без ультрадисперсных добавок составляет  $\approx 86,1\%$ . В случае с ультрадисперсными добавками шпинели магния наблюдается изменение содержания  $W$  от 85,7 % до 92,5 %; с ультрадисперсными добавками карбида кремния –  $W$  от 87,5 % до 93,9 %. С увеличением содержания основного карбидообразующего элемента  $W$  содержание  $Cr$  снижается незначительно, поэтому химический состав разработанных модифицированных твердосплавных материалов способствует увеличению количества карбидов вольфрама – одних из основных упрочняющих фаз.

Во всех составах среднее содержание углерода  $C$  колеблется от  $\approx 0,18\%$  (состав №6) до  $\approx 0,86\%$  (состав №0); контрольный состав №0 не содержит ультрадисперсных добавок. Наличие в составах содержания никеля (от 0,21 % до 1,75 %) указывает на более высокий температурный запас вязкости и меньшую склонность к хрупкому разрушению. Среднее содержание хрома  $Cr$  является более равномерным по разработанным составам №1–№7 от 0,027 % до 0,06 %, а в контрольном составе №0 наблюдается сравнительно большее



**Рис. 1.** Блок-схема изготовления опытных образцов твердосплавных пластин  
**Fig. 1.** The block diagram of the manufacture of prototypes carbide plates

количество: около 0,16 %.

В таблице приведены установленные физико-механические характеристики разработанных опытных твердосплавных материалов рабочего элемента буровой техники. Механическими испытаниями опытных образцов установлено, что при повышении плотности и твердости опытных компактов наблюдается снижение их предела прочности при поперечном изгибе. У опытных образцов отмечается снижение предела прочности при поперечном изгибе, однако, в допустимых пределах физико-механических характеристик промышленных твердосплавных пластин. Также наблюдается повышение плотности компакта отдельных составов (составы №1, №2, №6), увеличение твердости (составы №1, №5).

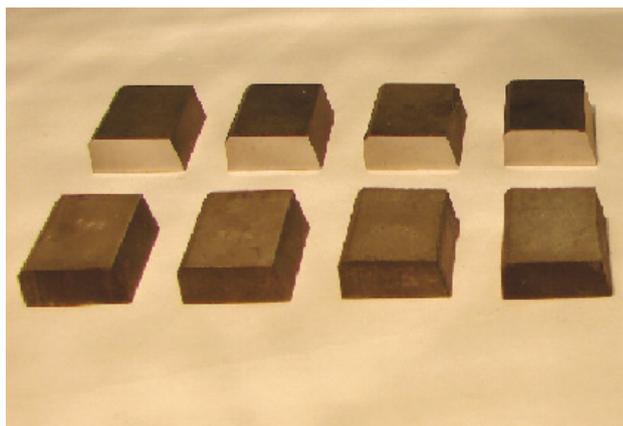
Как видно из таблицы, для образцов при увеличении количественного содержания ультрадисперсных добавок шпинели магния отмечается монотонное снижение предела прочности, содержание карбида кремния практически не влияет на уровень прочности при изгибе. Максимальное значение плотности показывают

образцы №1 и №2 (таблица).

Значение величины твердости определяется комплексом механических свойств материала: пределом прочности, износостойкостью и другими характеристиками. Из анализа измерения твердости следует, что для шпинели магния с увеличением количества ультрадисперсных добавок наблюдается немонотонное изменение твердости по Роквеллу, в случае с добавками карбида кремния у образцов происходит незначительное снижение твердости. При этом твердость твердосплавного материала четырех разработанных составов с добавками не ниже, чем твердость исходного материала.

Значения микротвердости опытных образцов существенно меняются в зависимости от формирующегося состава и микроструктуры (таблица). Как видно из таблицы, наибольшую среднюю микротвердость имеют образцы №0, №6 и №7 с карбидом кремния, что связано, видимо, с наибольшим количеством карбидообразующих элементов в составе.

Максимальные значения микротвердости на-



**Рис. 2.** Общий вид твердосплавных вольфрамокобальтовых пластин с ультрадисперсными добавками  
**Fig. 2.** General view of carbide tungsten-cobalt plates with ultrafine additives

блюдаются в составах №0 и №6  $\approx 13364$  МПа, однако, большее стандартное отклонение выявлено у контрольного образца №0, у которого наименьшее значение микротвердости  $\approx 10864$  МПа, а среднее значение микротвердости  $\approx 12089$  МПа. Таким образом, у твердосплавного материала без добавки обнаружен существенный разброс значений микротвердости, что свидетельствует о существовании возможных неоднородностей микроструктуры.

Многие исследования твердосплавных материалов при изучении физических и механических свойств опираются на металлографические дан-

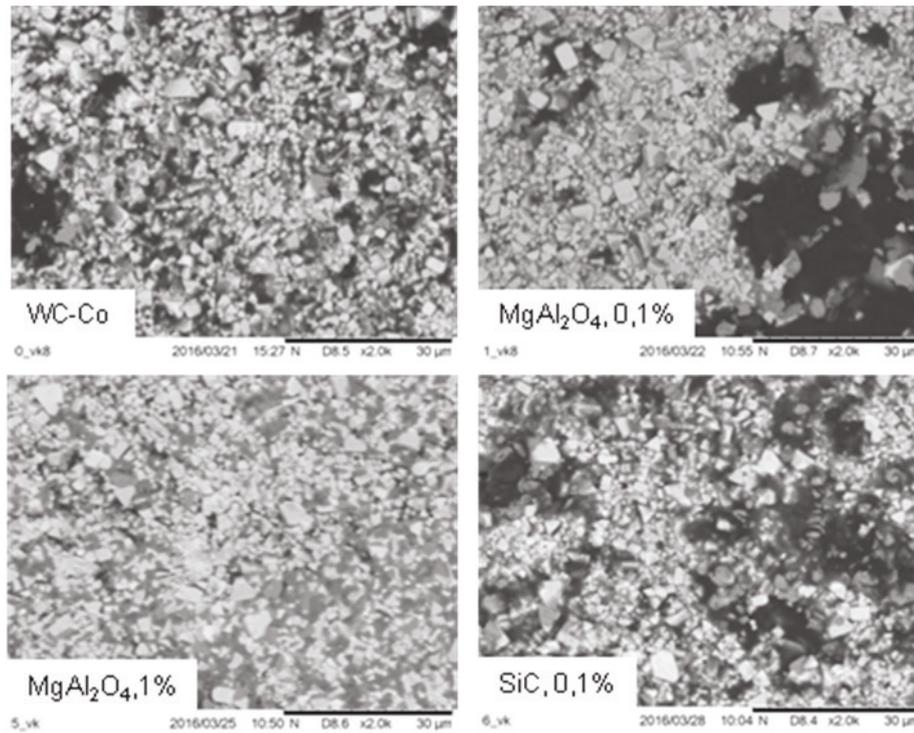
ные структуры этих сплавов [1–2,7,13–16]. Микроструктуры исследуемых вольфрамокобальтовых сплавов являются двухфазными: состоят из кристаллов WC и протравленных темных участков кобальтовой прослойки (рис. 3). Характерные размеры зерен WC составляют  $\approx 1 - 3$  мкм, которые по классификации сплавов WC-Co соответствуют частично средне- и мелкозернистым структурам [1,2,14,15]. Данная классификация составлена в зависимости от средней величины зерен карбидной составляющей. В некоторых исследованиях показано, что чем мельче зерна WC и равномернее они распределены в микроструктуре, тем лучше режущие свойства и выше прочность порошкового вольфрамового твердого сплава.

В работе установлено, что размеры зерен WC у опытных образцов буровых пластин различаются в зависимости от наличия и содержания ультрадисперсных добавок (таблица). Так, при травлении структуры опытных образцов выявлено, что с увеличением содержания ультрадисперсных добавок шпинели магния  $MgAl_2O_4$  протравленных участков становится больше. Как отмечено выше, введение в состав твердосплавных материалов ультрадисперсных порошковых добавок способствует торможению роста зерен WC. Таким образом, изменение размера зерен карбида вольфрама влияет на формирование структуры и физико-механические свойства опытных образцов.

**Физико-механические свойства и средний размер зерен опытных образцов твердосплавных буровых пластин**

**Physico-mechanical properties and the average grain size of prototypes carbide drilling plates**

| Образец   | Содержание % мас., вид добавки | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Предел прочности при поперечном изгибе $\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup> | Твердость, HRA | Микротвердость, МПа | Средний размер зерна карбида вольфрама, мкм |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|---|----------------|---------------------|---|
| Исх. обр. | -                              | 14,377                       | 182   | 89             | 12089               | 1,98  |
| №1        | 0,1 $MgAl_2O_4$                | 14,570                       | 158   | 89,5           | 8257                | 1,74  |
| №2        | 0,3 $MgAl_2O_4$                | 14,509                       | 131   | 89             | 10565               | 1,77  |
| №3        | 0,5 $MgAl_2O_4$                | 14,377                       | 123   | 89             | 8927                | 1,6   |
| №4        | 0,8 $MgAl_2O_4$                | 14,207                       | 120   | 88,5           | 9848                | 1,58  |
| №5        | 1,0 $MgAl_2O_4$                | 14,121                       | 112   | 90,5           | 10283               | 1,58  |
| №6        | 0,1 SiC                        | 14,473                       | 119   | 88,5           | 12336               | 1,93  |
| №7        | 0,2 SiC                        | 14,377                       | 119   | 87             | 11670               | 2,3   |



**Рис. 3.** Микроструктуры опытных образцов вольфрамокобальтовых сплавов с ультрадисперсными порошковыми добавками (x2000)

**Fig. 3.** Microstructures of prototypes of tungsten-cobalt alloys with ultrafine powder additives (x2000)

### Заклучение

Обоснована перспективность использования ультрадисперсных порошковых добавок  $MgAl_2O_4$  и  $SiC$  для изменения структуры и физико-механических свойств твердосплавных буровых пластин из ВК8. Введение ультрадисперсных порошковых добавок в состав вольфрамокобальтовых твердых сплавов способствует формированию мелкозернистой структуры с равномерным распределением зерен  $WC$ . Так, ультрадисперсные добавки шпинели магния  $MgAl_2O_4$  способствуют управлению микроструктурой твердосплавного материала опытных образцов буровых пластин в интервале содержания 0,1 % – 0,8 % мас.

Показатели предела прочности при поперечном изгибе несколько снижены у некоторых опытных образцов с добавками, но в допустимых пределах характеристик промышленных твердосплавных материалов. Для шпинели магния  $MgAl_2O_4$  с ростом количества ультрадисперсных добавок наблюдается монотонное снижение предела прочности, содержание карбида кремния практически не влияет на уровень прочности при изгибе.

Выявлено повышение плотности компакта отдельных составов (составы №1, №2, №6). Для составов со шпинелью магния с ростом количества ультрадисперсных добавок отмечается немонотонное изменение значений твердости по Роквеллу, с ростом содержания карбида кремния проис-

ходит снижение значений твердости.

Значение средней микротвердости состава №6 составляет 12336 МПа, что превышает микротвердость буровой пластины без добавок (12089 МПа). При повышении содержания ультрадисперсных добавок карбида кремния до 0,2 % мас. происходит некоторое снижение микротвердости до 10185 – 12891 МПа.

### Литература

1. Чапорова И. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 247 с.
2. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976. 528 с.
3. Савицкий Е. М., Поварова К. Б., Макаров П. В. Металловедение вольфрама. М.: Металлургия, 1978. 223 с.
4. Зеликман А. Н., Никитина Л. С. Вольфрам. М.: Металлургия 1978. 272 с.
5. ГОСТ 4411-79. Изделия твердосплавные для горного инструмента.
6. Корягин Ю.Д., Карева Н.Т., Мурашов В.В. Исследование структуры и свойств твердосплавных вставок породорезущих резцов // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2015. Т. 15, №3. С. 110–115.
7. Гордеев Ю.И., Абкарян А.К., Бинчуров А.С.,

Ясинский В.Б., Карнов И.В., Лепешев А.А., Хасанов О.Л., Двилис Э.С. Разработка эффективных путей управления структурой и свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Техника и технологии. 2014. Т.7, №3. С. 270–289.

8. Подболотов К.Б., Дятлова Е.М. Синтез керамических шпинельсодержащих композиционных материалов в режиме горения смесей магнетита и алюминия // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. №7. С. 16–21.

9. Анциферов В.Н., Гилев В.Г. Получение и свойства композитов карбид кремния – оксидная связка // Перспективные материалы. 2003. №2. С. 43–48.

10. Паранасенков В.П., Чикина А.А., Андреев М.А. Конструкционные материалы на основе самосвязанного карбида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. №7. С. 37–40.

11. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. 336 с.

12. Винокуров Г.Г., Васильева М.И., Шарин П.П., Федоров М.В. Упрочнение рабочих элементов твердосплавных буровых инструментов модифицированием ультрадисперсными добавками // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т.112, №2. С. 70–74.

13. C. Liu, N. Lin, YH. He, YC. Wang, X. Zhang. Effect of coarse grained WC addition on microstructure and mechanical properties of WC–Co // Mater Sci Eng Powder Metall. 2014. 19 (1). P. 123. doi: 10.1590/S1516-14392004000300012.

14. Rui-Jun Cao, Chen-Guang Lin, Xing-Cheng Xie, Zhong-Kun Lin. Microstructure and mechanical properties of WC–Co-based cemented carbide with bimodal WC grain size distribution // Rare Metals. 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s12598-018-1025-y>.

15. S. Laya, C.H. Alliberta, M. Christensenb, G. Wahnströmc. Morphology of WC grains in WC–Co alloys // Materials Science and Engineering: A. 2008. V. 486, iss. 1–2. P. 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.019>.

16. Wei Su, Yexi Sun, Huifeng Wang, Xianqi Zhang, Jianming Ruan. Preparation and sintering of WC–Co composite powders for coarse grained WC–8Co hardmetals // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2014. V. 45. P. 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.04.004>.

## References

1. Chaporova I. N., Chernjavskij K. S. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 247 с.

2. Трет'яков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов.

М.: Металлургия, 1976. 528 с.

3. Savickij E. M., Povarova K. B., Makarov P. V. Metallovedenie vol'frama. М.: Металлургия, 1978. 223 с.

4. Zelikman A. N., Nikitina L.S. Vol'fram. М.: Металлургия, 1978. 272 с.

5. GOST 4411-79. Izdelija tverdosplavnyye dlja gornogo instrumenta.

6. Korjagin Ju.D., Kareva N.T., Murashov V.V. Issledovanie struktury i svojstv tverdosplavnyh vstavok porodorezhushhijh rezcov // Vestnik JuUrGU. Serija Metallurgija. 2015. T. 15, №3. S. 110–115.

7. Gordeev Ju.I., Abkarjan A.K., Binchurov A.S., Jasinskij V.B., Karpov I.V., Lepeshev A.A., Hasanov O.L., Dvilis Je.S. Razrabotka jeffektivnyh putej upravlenija strukturoj i svojstvami tverdosplavnyh kompozitov, modifitsirovannyh nanochasticami // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija Tehnika i tehnologii. 2014. T.7, №3. S. 270–289.

8. Podbolotov K.B., Djatlova E.M. Sintez keramicheskijh shpinel'soderzhashhijh kompozicionnyh materialov v rezhime gorenija smesej magnezita i aljuminija // Ogneupory i tehniceskaja keramika. 2008. №7. S. 16–21.

9. Anciferov V.N., Gilev V.G. Poluchenie i svojstva kompozitov karbid kremnija – oksidnaja svjazka // Perspektivnye materialy. 2003. №2. S. 43–48.

10. Paranasenkov V.P., Chikina A.A., Andreev M.A. Konstrukcionnye materialy na osnove samosvjazannogo karbida kremnija // Ogneupory i tehniceskaja keramika. 2006. №7. S. 37–40.

11. Bal'shin M.Ju. Nauchnye osnovy poroshkovoje metallurgii i metallurgii volokna. М.: Металлургия, 1972. 336 с.

12. Vinokurov G.G., Vasil'eva M.I., Sharin P.P., Fedorov M.V. Uprochnenie rabochih jelementov tverdosplavnyh burovijh instrumentov modifitsirovanijem ul'tradispersnyimi dobavkami // Trudy GOSNITI. 2013. T.112, №2. S. 70–74.

13. C. Liu, N. Lin, YH. He, YC. Wang, X. Zhang. Effect of coarse grained WC addition on microstructure and mechanical properties of WC–Co // Mater Sci Eng Powder Metall. 2014. 19 (1). P. 123. doi: 10.1590/S1516-14392004000300012.

14. Rui-Jun Cao, Chen-Guang Lin, Xing-Cheng Xie, Zhong-Kun Lin. Microstructure and mechanical properties of WC–Co-based cemented carbide with bimodal WC grain size distribution // Rare Metals. 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s12598-018-1025-y>.

15. S. Laya, C.H. Alliberta, M. Christensenb, G. Wahnströmc. Morphology of WC grains in WC–Co alloys // Materials Science and Engineering: A. 2008. V. 486, iss. 1–2. P.253–261. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.019>.

16. Wei Su, Yexi Sun, Huifeng Wang, Xianqi Zhang, Jianming Ruan. Preparation and sintering of WC–

Co composite powders for coarse grained WC–8Co  
hardmetals // Int. Journal of Refractory Metals and

Hard Materials. 2014. V. 45. P. 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.04.004>.

*Поступила в редакцию 15.02.2019  
Принята к публикации 10.03.2019*

*Об авторах*

ФЕДОРОВ Михаил Владимирович, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г.Якутск, ул.Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0002-1193-3071>, [fedorov.83@mail.ru](mailto:fedorov.83@mail.ru);

ВАСИЛЬЕВА Мария Ильинична, кандидат технических наук, заведующий отделом, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г.Якутск, ул.Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0002-4466-5499>, [vasileva\\_mi@mail.ru](mailto:vasileva_mi@mail.ru);

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г.Якутск, ул.Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, [g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru).

*About the authors*

FEDOROV Mikhail Vladimirovich, Leading Engineer, Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1193-3071>, [fedorov.83@mail.ru](mailto:fedorov.83@mail.ru);

VASILYEVA Maria Ilinichna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4466-5499>, [vasileva\\_mi@mail.ru](mailto:vasileva_mi@mail.ru);

VINOKUROV Gennadiy Georgievich, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, [g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru).

*Информация для цитирования:*

Федоров М.В., Васильева М.И., Винокуров Г.Г. Использование ультрадисперсных порошковых добавок для получения твердосплавных рабочих элементов буровой техники Севера // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 1. С. 123–130. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-123-130>.

*Citation:*

Fedorov M.V., Vasilyeva M.I., Vinokurov G.G. The use of ultradispersed powder additives to obtain hard-alloy working elements of the drilling equipment of the North // Arctic and Subarctic natural resources. 2019. V. 24, no. 1. P. 123–130. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-123-130>.