УДК 621.762 : 622.23.05

О БУРОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА

© 2014 г. **Д. А. Захаров, А. П. Амосов, А. В. Сальников, М. А. Сальников**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)
ОАО «Волгабурмаш», г. Самара

Статья поступила в редакцию 07.04.2013 г., доработана 26.04.2013 г., подписана в печать 30.04.2013 г.

Д. А. Захаров – аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). Тел.: (846) 242-28-89. E-mail: zaharov.dmi@yandex.ru.
А. П. Амосов – докт. физ-мат. наук, профессор, заведующий этой кафедрой. Тел.: (846) 242-28-89. E-mail: mvm@samgtu.ru.
А. В. Сальников – главный металлург ОАО «Волгабурмаш» (443004, г. Самара, ул. Грозненская, 1). E-mail: sal321@yandex.ru.
М. А. Сальников – канд. техн. наук., науч. сотр. той же кафедры СамГТУ. E-mail: Mikhail.salnikov@mail.ru.

Исследовано влияние прочностных свойств кобальтовой связки и зерен карбида вольфрама на эксплуатационные характеристики твердосплавных зубков буровых долот. Полученные результаты использованы для разработки новых марок твердых сплавов на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: ВК6С, ВК10С, ВК15С и ВК15К. Установлено, что применение данных сплавов в производстве зубков дает возможность повышения механической скорости бурения за счет использования зубков с более агрессивной конструкцией. Показано, что новые марки сплавов позволяют также увеличить ресурс инструментальной оснастки из них.

Ключевые слова: зубки буровых долот, кобальтовая связка, углеродный баланс, магнитное насыщение, высокотемпературный карбид вольфрама, ударная циклическая стойкость, спекание с высоким давлением, микроструктура.

The effect of strength properties of cobalt binder and tungsten carbide grains on the operational characteristics of carbide drilling bits has been investigated. The results were used for development of new grades of hard alloys based on high-temperature tungsten carbides: BK6C, BK10C, BK15C and BK15K. Application of the given alloys in the manufacture of bits is established to afford the opportunity to increase of mechanical drilling rate at the cost of using the bits of more aggressive design. New grades of alloys are shown to allow increasing the life of tool inventory.

Key words: drilling bits, cobalt binder, carbon balance, magnetic saturation, high-temperature tungsten carbides, notch cycling resistance, high-pressure sintering, microstructure.

ВВЕДЕНИЕ

При выборе марки твердого сплава для производства зубков шарошечных буровых долот необходимо учитывать характер нагрузок, испытываемых твердосплавным зубком при бурении. Механизм разрушения породы при бурении зубками основан на принципе ее раздавливания с некоторым проскальзыванием, т. е. с истиранием. Поэтому к сплаву для производства зубков предъявляются повышенные требования по прочности к сжатию, абразивной стойкости и трещиностойкости.

В отечественной промышленности в качестве буровых сплавов используют твердые вольфрамокобальтовые сплавы, например ВК10КС, ВК11-ВК. Это среднезернистые сплавы, получаемые с применением нормализующего спекания, с размером зерна 4,0–5,5 мкм [1].

В ОАО «Волгабурмаш» (далее ОАО «ВБМ») для производства зубков основных и периферийных рядов использовались сплавы ВК10, ВК13 и ВК16, а для зубков обратного конуса шарошки – ВК9. Но случаи выхода из строя долот по причине прежде всего сколов, а также износа твердосплавного вооружения заставили заняться разработкой новых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОБАЛЬТОВОЙ СВЯЗКИ И ЗЕРЕН КАРБИДА ВОЛЬФРАМА НА СВОЙСТВА БУРОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Повышение трещиностойкости твердого сплава в основном определяется пластичностью кобальтовой связки, а та, в свою очередь, как показано ранее [2–5], в значительной мере – степенью легирования вольфрамом. Известно, что содержание вольфрама в кобальтовой связке находится в обратной зависимости от доли углерода в сплаве, и увеличение количества первого (W) приводит к быстрому снижению трещиностойкости сплава [1].

На основании проведенных в ОАО «ВБМ» исследований циклической стойкости установлен оптимальный диапазон содержания углерода

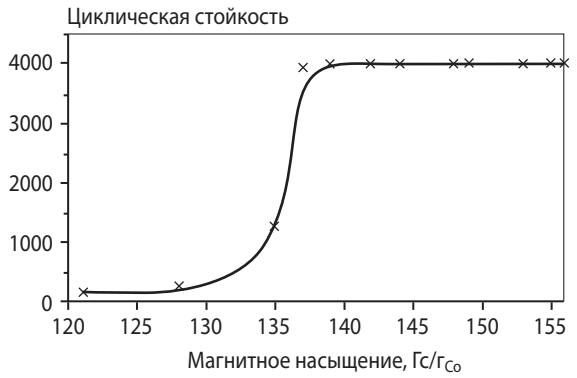


Рис. 1. Зависимость циклической ударной стойкости зубков из сплава WC–Co (10 % Co) от магнитного насыщения

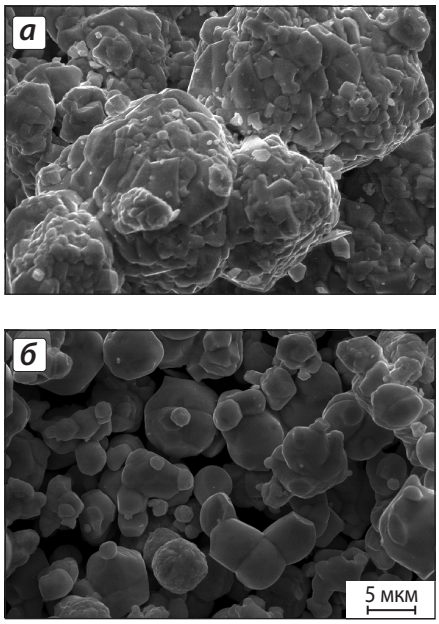


Рис. 2. Карбид вольфрама, изготовленный по низкотемпературной (***а***) и высокотемпературной (***б***) технологиям (×3000) $t_к$ = 1500 °С (***а***) и 2000 °С (***б***)

в сплаве в пределах двухфазной области: 6,08–6,13 мас.%, попадание в который обеспечивает высокую пластичность и трещиностойкость и, как следствие, высокую эксплуатационную стойкость твердосплавных зубков. При такой доле углерода достигаются максимальные показатели физико-механических свойств сплавов [3].

Величина магнитного насыщения твердого сплава также зависит от степени легированности кобальтовой связки вольфрамом. Причем эта зависимость носит такой же линейный характер, как и зависимость количества растворенного вольфрама от содержания углерода. Соответственно, чем больше магнитное насыщение, тем выше будет трещиностойкость сплава. Проведенные исследования циклической стойкости твердосплавных зубков при различном уровне магнитного насыщения позволили построить график этой зависимости (рис. 1) и выявить диапазон значений магнитного насыщения: 140–160 Гс/г$_{Co}$, гарантирующий высокую эксплуатационную стойкость твердосплавных зубков [4, 5].

Методика определения магнитного насыщения была отработана на магнитометре фирмы «Wolker LDG»(США), изготовленном по заданию ОАО «ВБМ». Контроль магнитного насыщения выполняет примерно такую же роль, как контроль циклической стойкости или содержания углерода в зубке после спекания, но имеет большое преимущество в силу быстродействия, объема исследуемого материала и неразрушающего характера анализа.

Вторым основным компонентом сплава является карбид вольфрама. В работах сотрудников ВНИИТС (г. Москва) показано, что зерна WC также имеют различную пластичность. В опытах Г. С. Креймера с сотр. устанавливалась степень влияния температуры карбидизации ($t_к$) на свойства получаемых сплавов [6]. Из карбидов вольфрама, синтезированных при разных температурах, были изготовлены образцы твердых сплавов ВК6 и ВК20 и определены их физико-механические характеристики. Для сплавов на основе высокотемпературного карбида вольфра-

Таблица 1. Кинетика измельчения карбидных зерен для разных видов карбидов вольфрама

Производитель карбида вольфрама	Номер партии	Технология изготовления	Исх. размер частиц, мкм	Размер частиц, мкм, после помола длительностью, ч					
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
ОАО «ВБМ»	2034	Низкотемп.	12,0	7,8	5,2	4,4	3,5	3,2	3,2
Китай	73	Высокотемп.	8,0	5,6	5,2	4,4	4,4	4,4	4,4
Китай	112	Высокотемп.	7,2	6,2	5,2	4,8	4,2	3,9	3,9
ОАО «Кировоградский з-д тв. сплавов»	08	Высокотемп.	7,4	5,2	4,8	4,4	3,9	3,5	3,5

ма ($t_к$ = 2200 °С) работа разрушения оказалась в 2–3 раза выше, чем для сплавов на основе низкотемпературного карбида [6].

В ОАО «ВБМ» проводилась работа по сравнительному анализу свойств сплавов на основе карбидов, изготовленных по низкотемпературной и высокотемпературной технологиям. В СамГТУ с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6390A были получены фотографии структур зерен низкотемпературных и высокотемпературных карбидов вольфрама (рис. 2).

Из анализа приведенных на рис. 2 фотографий видно, что низкотемпературный карбид имеет больший размер частиц с неоднородной поликристаллической структурой, состоящих из множества отдельных мелких кристаллитов. При дальнейшем размоле эти частицы сравнительно легко разрушаются на кристаллиты. В высокотемпературном карбиде подобная неоднородность выражена гораздо меньше, зерна более мелкие и состоят из малого числа кристаллитов, т. е. имеют более плотную структуру, близкую к монокристаллической [7]. При длительном размоле они разрушаются значительно труднее. Это подтверждается результатами исследований по установлению кинетики лабораторного размола низко- и высокотемпературных карбидов (табл. 1) [5].

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАРОК ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Как уже упоминалось, для оснащения основных рядов шарошек ранее применяли сплавы ВК10, ВК13 (с добавлением TaC) и, преимущественно, ВК16, т. е. приходилось использовать высококобальтовый сплав с целью увеличения пластичности. Но это, в свою очередь, приводило к снижению твердости, износостойкости вооружения, а значит, и к уменьшению проходки.

После получения вышеприведенных результатов исследований по твердым сплавам на основе высокотемпературных карбидов было принято решение о создании новых марок буровых сплавов с меньшим содержанием кобальта, но на основе высокотемпературных карбидов вольфрама. Так как в ОАО «ВБМ» нет возможности для производства высокотемпературных карбидов вольфрама, были сформулированы требования к порошку карбида и проведено согласование технических условий с несколькими производителями – поставщиками порошка.

Для зубков основных рядов были введены марки среднезернистых сплавов ВК10С и ВК15С с размером зерна 2,5–3,5 мкм (табл. 2). Для данных сплавов при сохранении размера карбидной фазы за счет более равномерной структуры сплава и использования высокотемпературного карбида вольфрама повышена как трещиностойкость, так и износостойкость по сравнению с ранее применяемыми сплавами. Зубки из этих сплавов успешно прошли испытания на циклическую стойкость на испытательном стенде, а также показали лучшие результаты, чем зубки из старых сплавов, при испытаниях в полевых условиях. Так, по результатам сравнительных испытаний, проведенных в 2008 г. в Полтавском ГОК, только за счет новых твердосплавных зубков получено увеличение проходки долот R745 почти на 60 % [5].

При разработке сплава для оснащения обратного конуса шарошек для зубков плоской формы было принято решение повысить износостойкость за счет некоторого снижения трещиностойкости. При этом использовали два технологических варианта: 1) уменьшение размера исходного зерна карбида вольфрама; 2) снижение содержания ко-

Таблица 2. Технические требования к твердым сплавам согласно стандарту предприятия ОАО «ВБМ»

Марка сплава	Плотность, г/см^3	Твердость, HRA	$\sigma_{изг}$, МПа	Пористость	Наличие η-фазы	Компаундирование, мкм	Большие кристаллы, мкм	Скопление крупных кристаллов, мкм	Сегрегация	Коэрцитивная сила, Э	Магнитное насыщение, Гс/г$_{Co}$
ВК16	13,80–14,00	86,0–87,5	≥ 2500	≤ А02, В02, С02	Не допуск.	До 15	До 40	До 80	Не допуск.	70–100	Не реглам-но
ВК10	14,45–14,65	87,4–88,2	≥ 2450	≤ А02, В02, С02	Не допуск.	До 15	До 40	До 80	Не допуск.	70–95	Не реглам-но
ВК9	14,20–14,35	88,2–89,0	≥ 2100	≤ А02, В02, С02	Не допуск.	До 10	До 25	До 50	Не допуск.	110–145	Не реглам-но
ВК10С	14,43–14,63	87,6–88,4	≥ 2450	≤ А0, В0, С1	Не допуск.	Не допуск.	До 40	Не допуск.	Не допуск.	70–90	140–160
ВК15С	13,90–14,10	86,0–87,5	≥ 2500	≤ А0, В0, С1	Не допуск.	Не допуск.	До 40	Не допуск.	Не допуск.	60–90	140–160
ВК6С	14,85–15,05	90,3–91,1	≥ 2000	≤ А0, В0, С1	Не допуск.	Не допуск.	До 25	Не допуск.	Не допуск.	135–155	140–160

бальта в сплаве. Это, соответственно, должно было повлечь за собой увеличение коэрцитивной силы и твердости получаемого нового сплава. Чем выше коэрцитивная сила, тем мельче размер зерен WC. А размер зерна определяет износостойкость сплава при одинаковом содержании кобальта [1, 6]. Таким образом, контролируя коэрцитивную силу твердосплавных зубков, можно контролировать зернистость и износостойкость сплава. Так в производство вместо сплава ВК9 была введена новая марка твердого сплава ВК6С с повышенными физико-механическими свойствами

Разработанные сплавы ВК6С и ВК15С, по сравнению с ранее используемыми, имеют меньшее содержание кобальта. В твердом сплаве это всегда приводит к получению более пористой структуры. Поэтому в производство была внедрена технология спекания в вакууме с дополнительной подачей высокого давления. С применением данного вида спекания было достигнуто практически полное исключение остаточной пористости (см. табл. 2).

На основе проведенных изменений технологического процесса переработан стандарт предприятия на технические требования к твердосплавным изделиям с включением в него новых марок сплава на основе высокотемпературных карбидов вольфрама.

Разработанные новые марки твердых сплавов обладают повышенными пластичностью и трещиностойкостью, что особенно важно для изготовления твердосплавных зубков шарошечных долот. При этом износостойкость их не уступает, а в случае с ВК6С даже превосходит характеристики применявшихся ранее сплавов.

Хороший набор свойств сплава ВК6С (см. табл. 2) позволил предположить, что возможно его использование в изготовлении износостойкой инструментальной оснастки, там, где ранее изделия из сплава ВК9 показывали плохие результаты из-за невысокой износостойкости. Примером такого инструмента стали резцы для изготовления наплавочных электродов, которые часто выходили из строя раньше установленного времени из-за выкрашивания режущих кромок. Для продления ресурса работы резцов в качестве их материала было принято решение применить буровой сплав ВК6С. Образцы сплава ВК6С, обладая однородной структурой, высокой плотностью и достаточной трещиностойкостью, выдерживают большие ударные нагрузки, а мелкие карбидные зерна с высокой твердостью противостоят истирающим воздействиям. Это подтвердили результаты сравнительных испытаний в условиях производства – ресурс работы резцов из сплава ВК6С

Таблица 3. Сравнительная таблица технических требований к твердым сплавам зубков для долот согласно стандарту предприятия «ВБМ» и ГОСТу

Свойства	СТП ОАО «ВБМ»	ГОСТ 3882-74	
	Сплав ВК10С	ВК11-ВК	ВК10КС
Плотность, г/см^3	14,43–14,63	14,1–14,4	14,2–14,6
Твердость, HRA	87,6–88,4	≥ 87,0	≥ 85,0
Коэрцитивность, Э	70–90	Не регламентируется	
Магнитное насыщение, Гс/г$_{Co}$	140–160	Не регламентируется	
$\sigma_{изг}$, МПа	≥ 2460	≥ 1900	≥ 1900
Пористость, %, по шкалам	max 0,02 (A1, B0, D0)	max 0,2 (ГОСТ 9391)	
Пористость, % (С – свободный углерод)	max 0,1 (C1)	max 0,2 (C2) (ГОСТ 9391)	
Микроструктура	1. Микроструктура должна быть однородной, без наличия η-фазы 2. Не допускается наличие отдельных крупных зерен карбида вольфрама размером > 40 мкм 3. Не допускается скопление β-фазы (компаундирование кобальта) 4. Не допускается наличие примесей другого сорта (сегрегация)	1. Не допускаются в структуре включения η-фазы 2. Не допускается наличие отдельных крупных зерен карбида вольфрама размером > 50 мкм (ГОСТ 4411) 3. Не регламентируется 4. Не регламентируется	
Макроструктура	Поверхность разлома не должна иметь расслойных трещин, рыхлот, пористости, избытка свободного углерода и η-фазы	Макроструктура должна быть однородной, без посторонних включений и расслоя. Не допускаются поры размером более 100 мкм (ГОСТ 4411)	

оказался в 8 раз выше, чем из ВК9 [8]. Результаты проведенной работы по повышению износостойкости отрезных резцов были оформлены актом о внедрении предложения об улучшении качества оснастки в ОАО «ВБМ».

Таким образом, использование высокотемпературных карбидов вольфрама в производстве буровых твердых сплавов позволило достичь хороших показателей трещиностойкости (K_{1c}) в сочетании с оптимальной износостойкостью зубков и инструментальной оснастки. Так, для сплава ВК10С получено K_{1c} = 12,7 МПа·м$^{1/2}$, износостойкость – 5,1 (в отн. ед.); для сплава ВК15С K_{1c} = 15,6 МПа·м$^{1/2}$, износостойкость – 3,0. Эти данные по нашим образцам твердых сплавов представлены компанией «Hughes» (США) – одним из ведущих производителей буровых долот в мире; они соответствуют техническим требованиям этой компании к твердым сплавам [9].

Сравнение технических требований к микроструктуре и физико-механическим свойствам буровых сплавов согласно стандарту предприятия ОАО «ВБМ» для сплава ВК10С и ГОСТу для отечественных сплавов ВК11-ВК и ВК10КС (см. табл. 3) свидетельствует в пользу нового сплава.

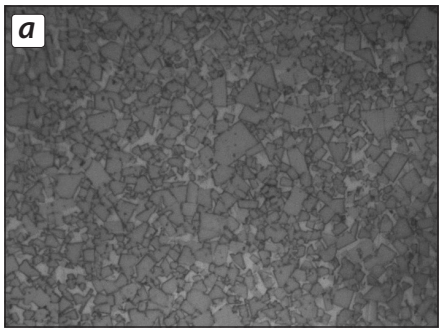
Сравнительно недавно (в 2010 г.) в стандарт предприятия ОАО «ВБМ» была введена новая марка крупнозернистого сплава ВК15К. Заказ на разработку данного сплава в сочетании с изменением геометрической конструкции твердосплавных зубков был получен от потребителей. Требовалось оснащение серии долот твердосплавными зубками более «агрессивной» конструкции (с усложнением формы и увеличением высоты рабочей части зубка), способными значительно повысить механическую скорость бурения средних пород без сколов и сломов. Для этого необходимо было в качестве материала зубков использовать твердый сплав повышенной прочности (трещиностойкости) с сохранением достаточной износостойкости. Для получения сплава ВК15К в ОАО «ВБМ» был впервые применен высокотемпературный карбид вольфрама WC11,5 с зернистостью 10–12 мкм. Технологический процесс включал операции мокрого размола-смешивания шихты в аттриторах, позволяющих получить однородную структуру, а также операцию спекания в вакуумно-компрессионных печах фирмы ALD (Германия). Микроструктуры образцов сплава ВК15К и ВК15С приведены на рис. 3.

Таблица 4. Результаты испытаний твердосплавных зубков из сплавов ВК15К, ВК10С и ВК15С на циклическую ударную стойкость

Тип зубка	Марка сплава	Давление в гидросистеме, МПа	Количество циклов нагружений	Характер разрушения
R15265	ВК15К	3,6	4000	Не разрушился
		3,6	4000	Не разрушился
		3,6	4000	Не разрушился
R6836	ВК10С	3,0	4000	Не разрушился
		3,0–3,2	3750	Скол вершины
		3,2	1800	Скол вершины
R2323	ВК15С	3,6	4000	Не разрушился
		3,6	4000	Не разрушился
		3,6	4000	Не разрушился

Из представленных изображений видно, что в сплаве ВК15К зерна крупнее, чем в ВК15С, распределение кобальтовой связки равномерное, не позволяющее трещине распространяться, т. е. здесь имеют место два фактора – высокая прочность самих зерен и высокая пластичность сплава, обусловленная увеличением толщины кобальтовых прослоек.

Подтверждением предположения о высокой трещиностойкости полученного сплава стали результаты испытания серийного зубка R15265 на циклическую ударную стойкость на специальном стенде, разработанном в ОАО «ВБМ» [10]. Из табл. 4 видно, что все три зубка R15265, подвергав-



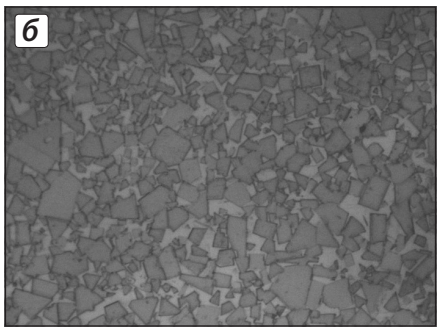


Рис. 3. Структура сплавов ВК15С (***а***) и ВК15К (***б***) (×1500)

шиеся испытанию, успешно выдержали нагрузки и не разрушились. Следует отметить, что зубки испытывались при практически максимальном гидравлическом давлении для данной испытательной установки. В табл. 4 представлены также результаты испытаний зубков из сплавов ВК10С и ВК15С с аналогичной формой рабочей части зубка.

Как показали испытания для зубков R6836 из сплава ВК10С, давление нагружения 3,0 МПа является предельным – при большем его значении происходит скол вершины, образующийся в углах сопряжения рабочей части зубка. Хотя следует отметить, что у данных зубков высота рабочей части меньше, а углы при вершине на 10° больше, чем у зубка R15265.

Зубки R2323 из сплава ВК15С не разрушились в ходе испытаний только потому, что имеют меньшую высоту рабочей части и больший на 15° угол при вершине, чем у зубка R15265. То есть зубок R2323 конструктивно спроектирован так, чтобы противостоять ударным нагрузкам в ущерб скорости бурения. Механическая скорость работы долота зависит от «агрессивности» конструкции зубка – от величины вылета зубка над телом шарошки (рабочей части зубка) и величины угла при вершине, т. е. чем острее угол, тем больше скорость бурения.

Разработка новой марки сплава ВК15К с повышенной трещиностойкостью дала возможность создать более агрессивную конструкцию зубков, позволившую увеличить механическую скорость бурения средних пород без сколов и сломов твердосплавного вооружения.

ВЫВОДЫ

1. Обсуждена определяющая роль характеристик пластичности и трещиностойкости компонентов твердых сплавов группы ВК в обеспечении высокой эксплуатационной стойкости твердосплавных зубков буровых шарошечных долот.

2. Показано влияние содержания углерода в сплаве на трещиностойкость твердых сплавов. Приведено оптимальное содержание углерода для буровых твердых сплавов.

3. Рассмотрено значение применения методики контроля магнитного насыщения твердого сплава.

4. Проведено сравнение прочностных и пластических свойств, а также строения зерен карбидов вольфрама, полученных при низких и высоких температурах карбидизации; показано преимущество высокотемпературных карбидов вольфрама. На основе этих результатов разработаны и введены в производство новые марки буровых сплавов на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: ВК6С, ВК10С, ВК15С и ВК15К с высокими показателями физико-механических свойств.

5. Установлено, что применение данных сплавов в производстве зубков дает возможность повышения механической скорости бурения за счет применения зубков с более агрессивной конструкцией.

6. Показано, что использование новых марок сплава позволяет также увеличить ресурс инструментальной оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панов В. С., Чувилин А. М., Фальковский В. А.* Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2004.
2. *Ахметсагиров С. М., Амосов А. П., Бичуров Г. В.* и др. // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тез. XVI Междунар. конф. (г. Самара, 24–26 июня 2006 г.). Самара: СамГТУ, 2006. С. 104.
3. *Ахметсагиров С. М., Амосов А. П., Бичуров Г. В.* и др. // Там же. С. 200.
4. *Бичуров Г. В., Сальников М. А., Ахметсагиров С. М.* // Там же. С. 201.
5. *Сальников М. А.* Разработка буровых твердых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2009.
6. *Третьяков В. И.* Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976.
7. *Fernando Almeida C. O., Bernard Granier, Jean-Marie Badie* // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2007. № 25(4). P. 351.
8. *Захаров Д. А., Сальников А. В., Амосов А. П.* // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тез. XVIII Междунар. конф. (г. Самара, 2–4 июля 2012 г.). Самара: СамГТУ, 2012. С. 68.
9. Каталог буровых твердых сплавов «Hughes-MPD Company», USA.
10. *Богомолов Р. М., Нассиф Н. С., Громаковский Д. Г., Ибатуллин И. Д.* // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2005. № 11. С. 21.