

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-78-87

Об опыте применения твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш»

© 2022 г. А.А. Жадяев^{1,2}, Д.А. Захаров²

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

² АО «Волгабурмаш», г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 29.03.2022 г., доработана 20.04.2022 г., подписана в печать 25.04.2022 г.

Аннотация: С 2017 г. на предприятии АО «Волгабурмаш» (г. Самара, Россия) проводились мероприятия по испытанию покупных твердосплавных порошковых смесей состава 90%WC–10%Co и готовых твердосплавных зубков различных производителей. Работа велась с целью оценки возможности применения покупных изделий в качестве исходных материалов на предприятии для сокращения производственного цикла изготовления твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот. Данные работы по товарозамещению (аутсорсингу) проводятся с целью возможного снижения себестоимости шарошечного долота и ускорения процесса его изготовления для функционирования предприятия в условиях острой рыночной конкуренции на внешнем и внутреннем рынках. Статья посвящена анализу и подробному сравнению микро- и макроструктуры, физических, механических, химических и технологических свойств покупных твердосплавных смесей и спеченных зубков различных производителей, в том числе и АО «Волгабурмаш». Определение всех характеристик исследуемых материалов проводилось в соответствии со стандартом предприятия СТП 582-17. Большое внимание уделено сравнению значений трещиностойкости сплавов, или вязкости разрушения по Палмквисту, и анализу снимков микроструктуры и характера распространения трещины после испытаний с использованием сканирующей электронной микроскопии. Также рассмотрены такие важные характеристики сплава, как твердость и предел прочности при поперечном изгибе. На основе результатов проведенных исследований представлены выводы о целесообразности использования в металлургическом цехе АО «Волгабурмаш» покупных твердых сплавов в сравнении с материалами собственного производства.

Ключевые слова: буровые шарошечные долота, вольфрамкобальтовые гранулированные смеси, твердые сплавы, зубки долот, структура, механические свойства, аутсорсинг.

Жадяев А.А. – аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244); вед. инженер-технолог АО «Волгабурмаш» (443004, г. Самара, ул. Грозненская, 1). E-mail: alexander-zhadyaev@yandex.ru.

Захаров Д.А. – канд. техн. наук, начальник цеха, АО «Волгабурмаш». E-mail: zaharov.dmi@yandex.ru.

Для цитирования: Жадяев А.А., Захаров Д.А. Об опыте применения твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш». *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16. № 3. С. 78–87. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-78-87.

About the experience of using hardmetals in the production of roller cone bits at Volgaburmash JSC

A.A. Zhadyaev^{1,2}, D.A. Zakharov²

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² JSC «Volgaburmash», Samara, Russia

Received 29.03.2022, revised 20.04.2022, accepted for publication 25.04.2022

Abstract: Since 2017, Volgaburmash JSC (Samara, Russia) tested purchased 90%WC–10%Co carbide powder mixtures and finished carbide drill bits from various manufacturers. The work was carried out in order to check the possibility of using purchased products as raw materials at the plant to reduce the production cycle for the manufacture of carbide inserts for roller cone bits. This intercommodity substitution (outsourcing) is carried out with the aim of potential cone bit cost reduction and production

process acceleration so that the plant can operate in the heavily competitive environment of foreign and domestic markets. The article focuses on the analysis and detailed comparison of the micro- and macrostructure, physical, mechanical, chemical and processing properties of purchased hard-alloy mixtures and sintered inserts of various manufacturers including Volgaburmash JSC. All properties of materials under study were determined in accordance with the VBM JSC company standard STP 582-17. Much attention is paid to comparing crack resistance or Palmqvist fracture toughness values of the alloy and analysis of microstructure images and fracture propagation pattern after using scanning electron microscopy tests. In addition, consideration is given to such important hard alloy properties as hardness and transverse bending strength. Based on the results of the conducted research, conclusions are presented on the expediency of using purchased hard-alloy materials at the Volgaburmash JSC metallurgical shop in comparison with internally manufactured materials.

Keywords: roller cone bits, tungsten-cobalt granular mixtures, hard alloys, bit inserts, structure, mechanical properties, outsourcing.

Zhadyaev A.A. – Postgraduate student of the Department of metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials, Samara State Technical University (443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244);
Leading process engineer of JSC «Volgaburmash» (443004, Russia, Samara, Groznenskaya str., 1).
E-mail: alexander-zhadyaev@yandex.ru.

Zakharov D.A. – Cand. Sci. (Eng.), Head of the shop of JSC «Volgaburmash».
E-mail: zaharov.dmi@yandex.ru.

For citation: Zhadyaev A.A., Zakharov D.A. About the experience of using hardmetals in the production of roller cone bits at Volgaburmash JSC. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 78–87 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-78-87.

Введение

Вольфрамкобальтовые спеченные твердые сплавы (WC—Co) с высокими показателями твердости, прочности, трещино- и износостойкости широко используются в различных отраслях современной промышленности [1–4]. Помимо наиболее распространенного применения этих материалов для производства режущего и штампового инструмента все большее значение приобретает их использование для изготовления буровых шарошечных долот, работающих при высоких температурах, в агрессивных средах и в условиях Крайнего Севера и Арктики [5]. Выход из строя долота на буровой установке в связи с быстрым износом твердосплавного вооружения — это наиболее частая проблема. Если при работе долота технологические режимы бурения не нарушались, но инструмент преждевременно вышел из строя по причине износа твердосплавных зубков, то это может быть вызвано неправильно подобранным твердым сплавом или наличием дефектов его структуры [6].

На одном из крупнейших в России предприятий по изготовлению буровых долот — АО «Волгабурмаш» (г. Самара), имеется собственный металлургический цех по производству твердосплавного вооружения. В условиях острой рыночной конкуренции в производстве породоразрушающего инструмента не только на внешнем, но и на российском рынках потребители данной продукции предъявляют высокие требования к ее качеству при приемлемой стоимости инструмента.

Одним из направлений возможного снижения себестоимости шарошечного долота и ускорения процесса его изготовления является использование готовых покупных полуфабрикатов или комплектующих, требующих минимального количества производственных операций [4, 7]. Производство спеченных твердых сплавов характеризуется сложностью технологических процессов и большим числом (>20) операций, которые трудоемки и требуют дорогостоящего оборудования [8–10].

В данной работе рассмотрены следующие полуфабрикаты и комплектующие от различных производителей.

- Готовые гранулированные вольфрамкобальтовые порошковые смеси. Их использование позволит производить формование изделий на прессах в полуавтоматическом режиме для дальнейшего спекания в вакууме, минуя участок собственного производства смеси.

- Спеченные твердосплавные зубки. Форма и геометрические параметры изделия, заложенные конструкторами в долото, заранее согласуются с поставщиком. Такие полуфабрикаты позволяют максимально сократить работу с твердосплавными изделиями, оставив только механообработку, минуя операции по изготовлению смеси, ее формованию (прессованию) и спеканию в вакууме.

Цель данной работы заключалась в подробном исследовании и сравнении состава, микрострук-

туры, физико-механических и технологических свойств покупных твердосплавных смесей WC—Co и спеченных зубков различных производителей, в том числе АО «Волгабурмаш», по полученным результатам оценить целесообразность использования этих материалов в металлургическом цехе АО «Волгабурмаш».

Материалы исследований

В качестве объектов исследования выбраны следующие материалы.

1. Гранулированные вольфрамокобальтовые порошковые смеси (табл. 1), содержащие, мас. %: 90 WC и $10 \pm 0,2$ Co; размер зерен WC до 3 мкм; пластификатор на основе парафина. Гранулы твердосплавных смесей имеют сферическую форму и используются в операции прессования твердосплавных комплектующих буровых долот (зуб-

ки, гидромониторные насадки, пяты и др.). Все смеси были проанализированы на соответствие требованиям стандарта предприятия СТП 582-17 АО «Волгабурмаш».

2. Спеченные твердосплавные зубки от разных производителей, соответствующие СТП 582-17 (табл. 2).

Методика исследований

Изучение морфологии и размеров частиц твердосплавных смесей с определением гранулометрического состава порошка проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Jeol JSM 6390A («JEOL Ltd.», Япония).

Для получения и исследования образцов твердых сплавов (ТС) спрессованные твердосплавные смеси подвергали жидкофазному спеканию в вакууме при температуре 1400 ± 30 °C до формирования конечной структуры [11–13]. Гравиметрическим методом определяли содержания общего ($C_{\text{общ}}$) и свободного ($C_{\text{св}}$) углерода в карбидах вольфрама по ГОСТ 25999-83 (ISO 3907:2009) [14]. (Концентрация общего углерода для сплавов WC—10%Co должна соответствовать 5,48—5,56 мас. %, что является факультативным значением.)

Плотность образцов ТС определяли гидростатическим методом на трех образцах от партии по ГОСТ 20018-74. Коэрцитивную силу оценивали в соответствии с ISO 3326:2013 (она уменьшается с увеличением содержания кобальта [15]). Твердость спеченных твердых сплавов определяли по Роквеллу по ГОСТ 25172-82 (ISO 3878-83) при нагрузке на образец 600 Н [16]. Оценку предела прочности при поперечном изгибе производили в соответствии с ГОСТ 20019-74 (ISO 3327:2009). Остаточную пористость ТС измеряли в соответствии с эталонными шкалами, заложенными в стандартах ГОСТ 9391-80 (ISO 4505-1978).

Исследование микроструктуры ТС осуществляли металлографическим методом согласно ISO 4499:2020 с использованием оптического металлографического микроскопа Axiotech 100HD-3D («Carl Zeiss», Германия) с увеличением до $1600\times$ и раствора Мураками для травления поверхности [17]. При этом не допускается наличие свободного углерода и η -фазы (двойного карбида вольфрама и кобальта «кружевной» и «озерковой» форм) для всех марок сплавов. Отклонения микроструктуры оценивали в соответствии с СТП 582-17.

Таблица 1. Гранулированные твердосплавные смеси

Table 1. Granular carbide mixtures

№ образца смеси	Производитель
1.1	АО «Волгабурмаш», Россия
1.2	Поставщик 1, Германия
1.3	Поставщик 2, Китай
1.4	Поставщик 3, Россия
1.5	Поставщик 4, Россия

Таблица 2. Спеченные твердосплавные зубки

Table 2. Sintered carbide inserts

№ обр.	Co, мас. %	Производитель
2.1	6	АО «Волгабурмаш», Россия
2.2	10	
2.3	15	
2.4	6	Поставщик 1, Россия
2.5	10	
2.6	13	
2.7	10 (Функционально-градиентный сплав)	Поставщик 2, Германия
2.8	10	Поставщик 3, Китай
2.9	6	Поставщик 4, Швеция
2.10	10	Поставщик 5, Германия

Значительное внимание было уделено исследованию трещиностойкости — способности материала сопротивляться распространению трещины и, соответственно, разрушению. В случае сплавов WC—Co, применяемых для зубков буровых долот, именно значение вязкости разрушения лучше всего говорит о потенциале материала по сопротивлению к разрушению. Это структурно-чувствительная характеристика, измерение которой позволяет оценить чувствительность сопротивления материала распространению трещины [18, 19]. Значение трещиностойкости (W_k , МН·м^{-3/2}) спеченных твердых сплавов рассчитывали по методу Палмквиста согласно ISO 28079:2009.

Для более детального изучения поверхности и характера распространения трещины использовали сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM 6390A [13, 19]. В ранее проведенных нами работах [20, 21] описан анализ трещиностойкости твердых сплавов с установлением ее фактических значений.

Исследования твердости, трещиностойкости и микроструктуры образцов проводились на глубине 2 мм от поверхности рабочей части зубка, что

является средней глубиной износа твердого сплава («рабочей зоной зубка») до момента непригодного для работы состояния долота.

Результаты исследований и их обсуждение

О морфологии и размерах частиц гранулированных твердосплавных смесей можно судить по полученным СЭМ-изображениям (рис. 1). Видно, что смеси 1.1 и 1.2 имеют четкую выраженную сферическую форму гранул размером 50—200 мкм и однородный дисперсионный состав. Гранулы смесей 1.3, 1.4 и 1.5 частично разрушены и загрязнены более мелкой фракцией, что обусловлено измельчением порошка в результате его транспортировки, когда верхние слои порошка, имея большой удельный вес, разрушают нижние. Смесь 1.5 имеет неоднородный размер частиц. Во избежание этого потребуются применение дополнительных операций типа классифицирования (просеивания) и галтования (для придания сферической формы), что замедлит и усложнит процесс производства годной смеси и увеличит себестоимость продукции, так как будут техно-

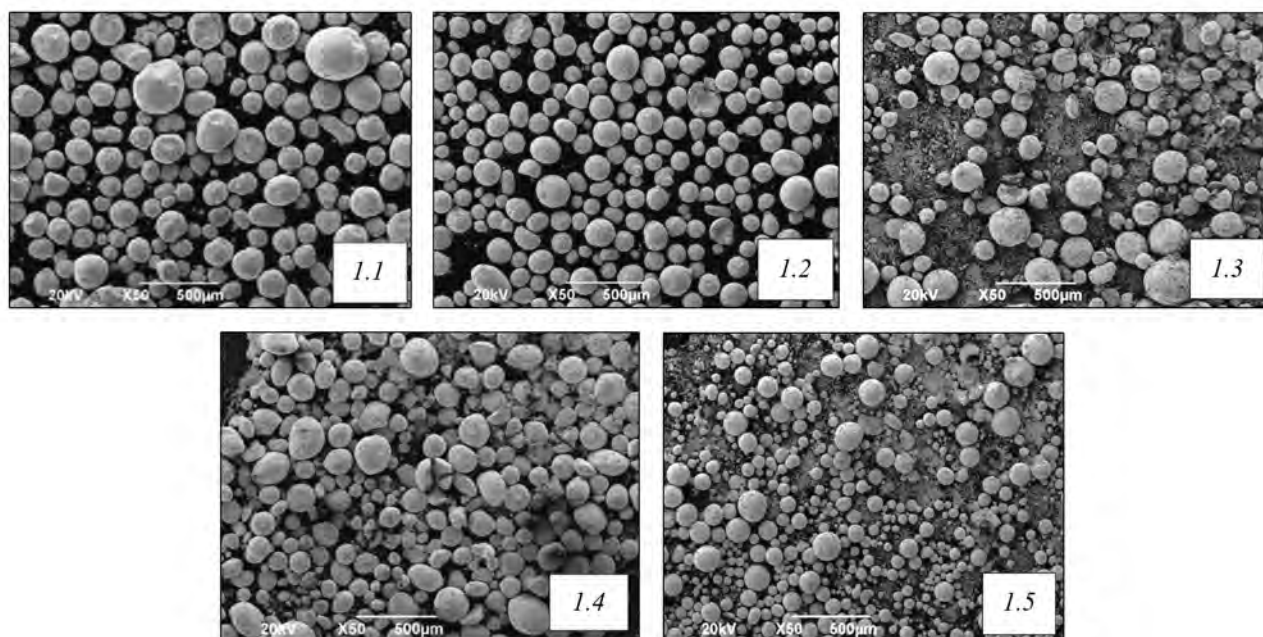


Рис. 1. Микрофотографии образцов гранулированных твердосплавных смесей 1.1–1.5 (см. табл. 1)
Увеличение 50×

Fig. 1. Micrographs of samples of granulated carbide mixtures 1.1–1.5 (see Table 1)
×50 magnification

логические потери в виде отсевов порошка. Отсюда следует, что полная остановка собственного производства смесей в АО «Волгабурмаш» приведет к невозможности возврата данных отсевов в производство, что увеличит себестоимость продукции.

Химический состав и некоторые технологические свойства твердосплавных гранулированных смесей представлены в табл. 3. По технологическим свойствам образцы 1.2, 1.3 и 1.4 имеют отклонения по насыпной плотности и текучести, которые впоследствии привели к затруднени-

ям при прессовании изделий на полуавтоматических прессах. Это вызвано неоднородностью гранул порошка. Также в смеси 1.4 превышено содержание парафина, что может вызвать непрогнозируемую усадку изделия в процессе спекания и повлиять на содержание углерода в структуре.

На рис. 2 представлены фотографии структуры сплавов, спеченных из гранулированных твердосплавных смесей 1.1–1.5 (см. табл. 1). Микроструктура сплавов в целом соответствует СТП 582-17.

Таблица 3. Состав и свойства исследуемых твердосплавных смесей

Table 3. Composition and properties of hard alloy mixtures studied

№ образца	Содержание, мас. %				Насыпная плотность, г/см ³	Текучесть, с
	$C_{\text{общ.}}$	$C_{\text{св.}}$	Со	Парафин		
Тех. требования	5,48–5,56	≤0,05	10 ± 0,5	2 ± 0,25	3,45 ± 3,65	≤30
1.1	5,56	0,02	9,9	2,25	3,57	28
1.2	5,56	0,03	9,9	1,92	4,07	34,5
1.3	5,59	0,04	10,3	2,06	3,22	35
1.4	5,61	0,02	10,0	2,33	3,49	32
1.5	5,68	0,04	9,9	2,03	3,59	30

Примечание. Выделенные значения имеют отклонение от технических требований.

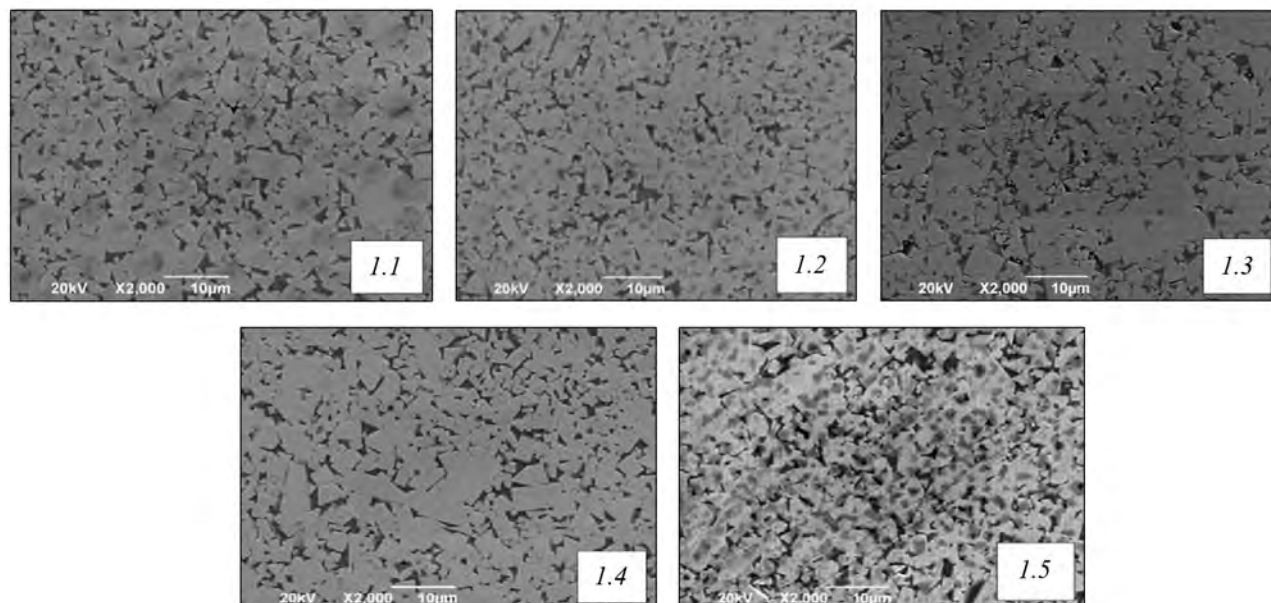


Рис. 2. Фотографии структуры сплавов, спеченных из смесей 1.1–1.5

Увеличение – 2000×

Fig. 2. Structure photographs of alloys sintered from mixtures 1.1–1.5

×2000 magnification

Таблица 4. Физико-механические свойства спеченных твердосплавных образцов

Table 4. Physical and mechanical properties of sintered carbide samples

№ образца	ρ , г/см ³	HRA	H_c , Э	$\sigma_{изг}$, Н/мм ²	$d_{ср}$, мкм	W_k , МН·м ^{-3/2}	l , мкм
Тех. требования	14,5 ± 0,1	88,2 ± 0,3	75–95	≥2450	2,5–3,0	Факт.*	Факт.*
1.1	14,53	88,3	83	2960	2,6	17,6	86
1.2	14,51	88,4	87	3150	2,5	17,5	89
1.3	14,47	88,3	97	2670	2,6	15,9	107
1.4	14,51	88,3	79	2900	2,6	16,8	97
1.5	14,53	88,3	83	2960	2,6	17,3	82

* Фактическое значение является факультативным, не регламентируется и служит для дополнительной информации.

Таблица 5. Физические и механические свойства зубков, содержащих 10 мас.% Со

Table 5. Physical and mechanical properties of inserts with 10 wt.% Co content

№ образца	ρ , г/см ³	HRA	H_c , Э	$\sigma_{изг}$, Н/мм ²	$d_{ср}$, мкм	W_k , МН·м ^{-3/2}	l , мкм
Тех. требования	14,53 ± 0,1	88,2 ± 0,3	75–95	≥2450	2,5–3,0	Факт.	Факт.
2.2	14,53	88,3	83	2960	2,6	17,1	82
2.5	14,53	88,3	84	2900	2,5	17,2	81
2.7	14,55	88,8	90	2950	2,7	16,2	90
2.8	14,56	88,4	91	2910	2,4	17,0	69
2.10	14,53	88,0	87	2850	2,5	16,8	87

Примечание. Выделенные значения имеют отклонение от тех. требований.

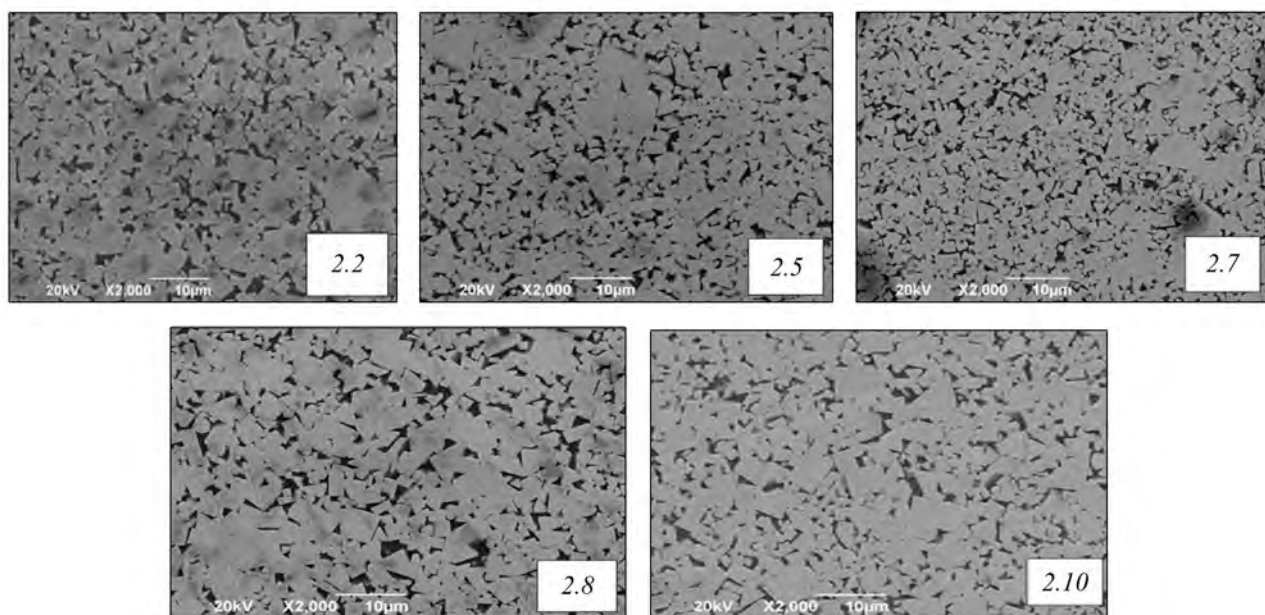


Рис. 3. Фотографии структуры зубков, содержащих 10 мас. % Со

Увеличение 2000×

Fig. 3. Structure photographs of inserts with 10 wt.% Co content

×2000 magnification

Таблица 6. Физические и механические свойства зубков, содержащих 13 и 15 мас.% Co

Table 6. Physical and mechanical properties of inserts with 13 and 15 wt.% Co content

№ образца	ρ , г/см ³	HRA	H_c , Э	$\sigma_{изг}$ Н/мм ²	$d_{ср}$, мкм	W_k , МН·м ^{-3/2}	l , мкм
Тех. требования	$14,0 \pm 0,1$	$86,5 \pm 0,5$	70–90	≥ 2700	2,5–3,5	Факт.	Факт.
2.3	13,99	87,1	79	3130	2,4	20,3	60
2.6	14,25	86,6	75	2750	2,8	20,5	56

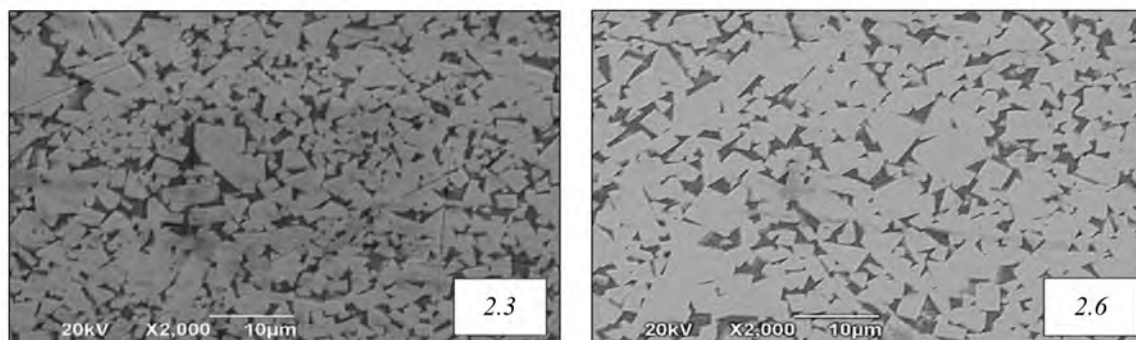


Рис. 4. Фотографии структуры зубков, содержащих 15 и 13 мас.% Co

Увеличение 2000 $\times$

Fig. 4. Structure photographs of inserts with 15 and 13 wt.% Co content

 $\times 2000$ magnification

Однако на снимке образца 1.3 имеется один участок сегрегации размером 27 мкм и два участка компаундирования, суммарная длина которых достигает 10 мкм. В структуре сплава 1.5 также наблюдается скопление кристаллов размером 175 мкм и один участок компаундирования — 13 мкм. Отметим, что данные отклонения находятся в допуске указанного стандарта «Волгабурмаш».

Результаты определения физических и механических свойств спеченных образцов 1.1–1.5: плотности (ρ), твердости (HRA), коэрцитивной силы (H_c), предела прочности при поперечном изгибе ($\sigma_{изг}$), среднего размера зерна ($d_{ср}$), вязкости разрушения (W_k) и длины трещины (l), представлены в табл. 4.

Далее были проведены сравнительные исследования структуры и свойств твердосплавных зубков различных производителей (см. табл. 2). В табл. 5 показаны результаты для образцов, содержащих 10 мас.% Co (см. табл. 2), а на рис. 3 — фотографии их структуры.

Сплав образца 2.7 по запатентованной производителем технологии является функционально-градиентным, что говорит о различном содержании Co по объему изделия и влияет на физико-механические свойства зубка.

Анализ показал, что структура соответствует нормативу СТП. Зубок 2.8 имеет сегрегацию размером 57 мкм, в образцах 2.5 и 2.10 обнаружены по два участка компаундирования размером 11 и 7 мкм соответственно, а в образце 2.2 — скопление кристаллов суммарным размером 124 мкм. Отметим, что все описанное находится в пределах допуска СТП.

В табл. 6 представлены физические и механические свойства твердосплавных зубков, содержащих 13 и 15 мас.% Co, а на рис. 4 — фотографии их микроструктуры. Зубок 2.6 имеет два участка с дефектом сегрегации WC суммарной длиной 51 мкм, что допускается стандартом.

В табл. 7 представлены физические и механические свойства твердосплавных зубков, содержащих 6 мас.% Co, а на рис. 5 — фотографии их микроструктуры. Образец 2.1 имеет два участка скопления кристаллов WC, суммарный размер которых составляет 103 мкм, а зубок 2.9 — один участок компаундирования размером 8 мкм и три участка сегрегации — 72 мкм. Данные отклонения также допускаются СТП.

На рис. 6 приведены фотографии распространения трещины в образцах зубков, содержащих 10, 15 и 6 мас.% Co.

Таблица 7. Физические и механические свойства зубков, содержащих 6 мас.% Со

Table 7. Physical and mechanical properties of inserts with 6 wt.% Co content

№ образца	ρ , г/см ³	HRA	H_c , Э	$\sigma_{изг}$, Н/мм ²	$d_{ср}$, мкм	W_k , МН·м ^{-3/2}	l , мкм
Тех. требования	$14,95 \pm 0,1$	$90,1 \pm 0,5$	110–145	≥ 2300	2,0–2,5	Факт.	Факт.
2.1	14,91	90,3	132	2420	2,2	13,1	99
2.4	14,86	90,5	107	2670	2,5	13,0	96
2.9	14,98	90,4	130	2750	2,7	12,6	103

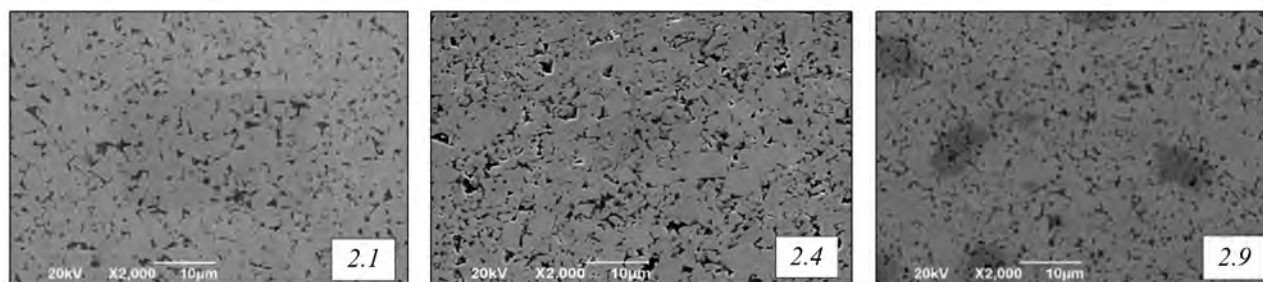


Рис. 5. Фотографии структуры зубков, содержащих 6 мас.% Со

Увеличение 2000 $\times$

Fig. 5. Structure photographs of inserts with 6 wt.% Co content

$\times 2000$ magnification

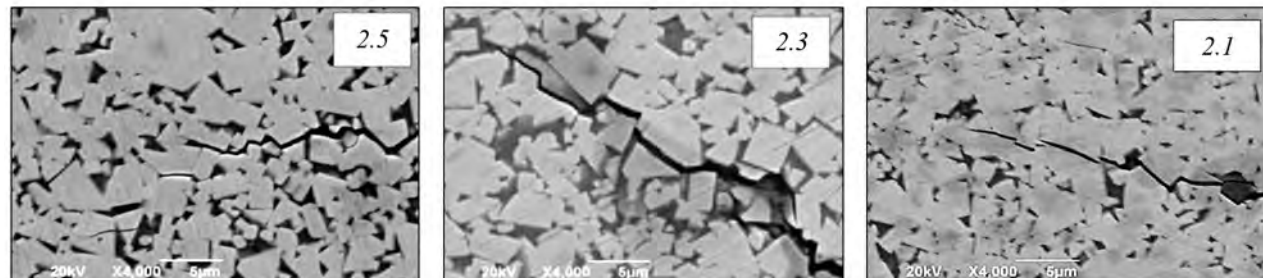


Рис. 6. Распространение трещины в зубках, содержащих 10, 15 и 6 мас.% Со

Увеличение 4000 $\times$

Fig. 6. Fracture propagation in inserts with 10, 15 and 6 wt.% Co content

$\times 4000$ magnification

Детальный анализ участков трещины показал, что в исследуемых образцах в основном происходит межзеренное разрушение (по границе зерен WC) — трещины распространяются по кобальтовой связке [22]. Транскристаллитный раскол для ТС с содержанием 10 мас.% Со редок и, как правило, встречается у более пластичных сплавов с ббльшим содержанием кобальта. Для ТС с содержанием 13 и 15 мас.% Со разрушение происходит по зернам WC, что видно на рис. 6 (обр. 2.3).

Выводы

Полученные в настоящей работе результаты сравнительных исследований структуры и свойств гранулированных твердосплавных смесей (см. табл. 1) и спеченных твердосплавных зубков различных производителей (см. табл. 2) с учетом стоимости и сроков поставки позволяют сделать следующие выводы о целесообразности их применения для изготовления твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот в АО «Волгабурмаш».

1. Готовые твердосплавные смеси 1.2 и 1.5 в большей степени соответствуют требованиям СТП 582-17 АО «Волгабурмаш» к изготавливаемой продукции, но имеют выше стоимость и средний срок поставки около 2 мес.

2. Гранулы твердосплавных смесей 1.3 и 1.4 в результате транспортировки частично разрушаются и загрязняются мелкой фракцией порошка, что требует дополнительных трудозатрат для доработки данных смесей. Их можно использовать в качестве основного сырья для производства твердосплавных изделий, но с учетом следующих условий:

- требуется проведение дополнительных операций доработки смеси;
- в момент доработки присутствуют технологические потери смеси, которые могут составлять около 10 % от массы партии;
- при доработке смеси получается мелкая фракция порошка, не пригодная для работы;
- себестоимость продукции, изготовленной из данных смесей, будет выше, чем из смеси собственного производства;
- средний срок поставки смесей 1–2 мес;
- при отклонении параметров на входном контроле потребуется переработка всей партии.

3. Сравнивая физико-механические свойства образцов из всех смесей, можно сделать вывод о том, что они соответствуют требованиям СТП 582-17 АО «Волгабурмаш» и имеют практически схожие характеристики. Однако трещиностойкость спеченного образца из образца сплава 1.3 ниже ($W_k = 15,9 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$) по сравнению с другими (среднее значение $W_k = 17,4 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$) за счет малого размера зерна и большего содержания свободного углерода.

4. Все исследованные твердосплавные зубки по физико-механическим свойствам соответствуют стандарту предприятия и могут быть использованы для комплектования буровых шарошечных долот.

5. Зубок 2.9, содержащий 6 мас.% Со, имеет однородную структуру и высокие физико-механические свойства, превосходящие другие образцы благодаря условиям синтеза сплава при производстве.

6. Среди зубков с содержанием 10 мас.% Со образец 2.7 является градиентным, имеющим разное содержание кобальта от поверхности сплава к сердцевине. В исследуемой рабочей зоне зубка (до 2 мм в глубину от поверхности) твердость составила 89 HRA, что превышает требуемые значения СТП. Этим и обусловлен низкий коэффициент трещиностойкости $W_k = 16,1 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$.

Зубки из этого сплава не используются в АО «Волгабурмаш» из-за худших показателей стойкости по отработке долот, чем у зубков собственного производства.

7. Образцы зубков 2.4, 2.5 и 2.6 соответствуют требованиям к физико-механическим свойствам, предъявляемым к такому типу изделий на предприятии. Они имеют однородную структуру без наличия критических дефектов. На данный момент времени зубки данного производителя поставляются в АО «Волгабурмаш», и ими частично или полностью укомплектовываются долота по желанию потребителей.

8. Зубок 2.8 имеет средние показатели твердости (88,4 HRA) и трещиностойкости ($17 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$), а также однородную структуру. Из-за худших показателей по отработке долот, чем у зубков производства АО «Волгабурмаш», их поставка нецелесообразна.

9. Зубки, соответствующие образцу 2.10, по физико-механическим свойствам и структуре соответствуют СТП 582-17. Производитель поставляет в АО «Волгабурмаш» два типа таких зубков по желанию потребителя.

Недостатками покупных твердосплавных зубков являются:

- повышенная себестоимость изготовления долота;
- средний срок поставки зубков ~2 мес;
- каждый новый тип зубка (форма) требует согласования с конструкторской документацией, а также затрат средств и времени на изготовление пресс-форм;
- во избежание проблемы при запрессовке зубка в тело шарошки часто возникает необходимость проведения дополнительной операции по шлифованию заходной фаски на цилиндрической части (около дна) зубка с целью увеличения ее высоты, что усложняет производственный процесс;
- отсутствие возможности в короткие сроки доукомплектовать заказ в случае изменения производственного плана предприятия.

Таким образом, в варианте с собственным производством твердосплавных зубков указанные недостатки минимальны.

Литература/References

1. Okada K., Osada A. Microstructural study on the grain growth inhibition of VC-doped WC—Co cemented

- carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2017. No. 62. P. 149–154.
2. Fang Z.Z., Eso O.O. Liquid phase sintering of functionally graded WC—Co composites. *Scr. Mater.* 2005. No. 52. P. 785–791.
3. Furushima R., Katou K., Shimojima K., Hosokawa H., Matsumoto A. Control of WC grain sizes and mechanical properties in WC—FeAl composite fabricated from vacuum sintering technique. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. No. 50. P. 16–22. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.11.007.
4. Chang S.H., Chang M.H., Huang K.T. Study on the sintered characteristics and properties of nanostructured WC—15 wt.% (Fe—Ni—Co) and WC—15 wt.% Co hard metal alloys. *J. Alloys. Compd.* 2015. No. 649. P. 89–95.
5. Панов В.С., Коняшин И.Ю., Левашов Е.А., Зайцев А.А. Твердые сплавы: Учебник. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2019.
Panov V.S., Konyashin I.Yu., Levashov E.A., Zaitsev A.A. Hard alloys: Textbook. Moscow: MISIS, 2019 (In Russ.).
6. Zhadyaev A., Zakharov D., Amosov A., Novikov V. Comparative analysis of physical and mechanical properties of hard alloy products depending on the synthesis mode. *AIP Conf. Proc.* 2021. Vol. 2402. P. 020056. DOI: 10.1063/5.0071653.
7. Guo Z.X., Xiong J., Yang M., Xiong S.J., Chen J.Z., Bi S.Q. Characterization and properties of MTCVD Ti(C,N) coated cemented carbide substrates with Fe/Ni binder. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2010. No. 28. P. 238–242.
8. Norgren S., García J., Blomqvist A., Yin L. Trends in the P/M hard metal industry. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. No. 48. P. 31–45.
9. Daniele Mari, Luis Miguel, Christoph Nebel. Encyclopedia comprehensive hard materials. Amsterdam: Elsevier, 2015. Vol. 1. P. 29–90.
10. García J., Strelsky W., Lackner M. (Eds.). Ch. 9: Process development and scale up of cemented carbide production in scale-up in metallurgy. *Verlag Process. Eng.* 2010. P. 235–265.
11. Ortner H., Kolaska H., Ettmayer P. The history of the technological progress of hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2014. No. 44. P. 148–159.
12. Zak Fang Z., Wang X., Ryu T., Hwang K.S., Song H.Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide: A review. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2009. No. 27. P. 288–299. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.011.
13. González Oliver C.J.R., Álvarez E.A., García J.L. Kinetics of densification and grain growth in ultrafine WC—Co composites. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2016. No. 59. P. 121–131.
14. Bolton D., Keely R.J. Effects of nonstoichiometric carbon contents on the fracture toughness of WC—Co hardmetal alloys. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1982. No. 1 (3). P. 103–111.
15. Stjernberg K.G. Some relations between the structure and mechanical properties of WC—TiC—Co alloys. *Powder Metall.* 1970. No. 13 (25). P. 1–12.
16. Jonsson H. Studies of the binder phase in WC—Co cemented carbides heat-treated at 950 °C. *Planseeberichte für Pulvermetallurgie.* 1975. Vol. 23. P. 37–55.
17. Hosokawa H., Shimojima K., Mabuchi M., Kawakami M., Sano S., Terada O. Effects of the WC grain size on the surface roughness of WC—10%Co cemented carbide micro-die machined by FIB. *Mater. Trans.* 2002. No. 43 (12). P. 3273–3275.
18. Кушаренко В.М., Репях В.С., Чирков Е.Ю., Кушнаренко Е.В. Дефекты и повреждения деталей и конструкций. Оренбург: ОГУ, 2011.
Kusharenko V.M., Repyakh V.S., Chirkov E.Yu., Kushnarenko E.V. Defects and damage to parts and structures: monograph. Orenburg: OGU, 2011 (In Russ.).
19. Shing T.L., Luyckx S., Northrop I.T., Wolff I. The effect of ruthenium additions on the hardness, toughness and grain size of WC—Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2001. No. 19 (1). P. 41–44.
20. Захаров Д.А., Жадяев А.А. Пути повышения качества твердосплавного вооружения буровых долот. *Металлургия машиностроения.* 2020. No. 5. С. 32–36.
Zakharov D.A., Zhadyaev A.A. Ways to improve the quality of hard-alloy weapons of drilling bits. *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2020. No. 5. P. 32–36 (In Russ.).
21. Жадяев А.А. Исследование трещиностойкости вольфрамокобальтовых сплавов ВК10С производства АО «Волгабурмаш» и VK10 производства Китай. В сб. *За нами будущее: Взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: Тр. Всероссийской молодежной научной конференции* (05 июня 2020 г.). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 238–242.
Zhadyaev A.A. Investigation of crack resistance of tungsten-cobalt alloys VK10S produced by «Volga-burmash» JSC and VK10 produced in China. In: *Za nami budushchee: Vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva: Trudy Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* (June 05, 2020). Kursk: Yugo-Zapadnyi Gos. Universitet, 2020. P. 238–242.
22. Shing T.L., Luyckx S., Northrop I.T., Wolff I. The effect of ruthenium additions on the hardness, toughness and grain size of WC—Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2001. No. 19 (1). P. 41–44.