

Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. №6 (132). С. 3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №6 (132). P. 3-11.

Научная статья
УДК 621.762
doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-3-11

Физико-механические свойства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот с типичными для сплава WC-Co неоднородностями структуры

Александр Александрович Жадяев, аспирант
Самарский государственный технический университет,
АО «Волгабурмаш», Самара, Россия
Alexander-zhadyaev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7367-6170>

Аннотация. Проведен анализ типичных дефектов микроструктуры сплавов WC-Co, используемых в производстве зубков буровых шарошечных долот, их влияние на физико-механические свойства и трещиностойкость твердого сплава и описаны причины возникновения данных дефектов.

Ключевые слова: буровые шарошечные долота, вольфрамкобальтовые сплавы, дефекты твердого сплава, структура, механические свойства, трещиностойкость

Для цитирования: Жадяев А.А. Физико-механические свойства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот с типичными для сплава WC-Co неоднородностями структуры // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – №6 (132). – С. 3-11. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-3-11

Original article

Physical and mechanical properties of WC-Cocemented carbides of roller cone bits with inhomogeneous structures

Zhadyaev A. Alexander, postgraduate student
Samara State Technical University, Samara, Russia
JSC Volgaburmash, Samara, Russia
Alexander-zhadyaev@yandex.ru

Abstract. The analysis of typical defects in the microstructure of WC-Co alloys used in the production of cone drill bit teeth, their influence on the physical and mechanical properties and crack resistance of the cemented carbide, and a description of the causes of these defects have been carried out.

Keywords: froller bits, tungsten-cobalt alloys, cemented carbide defects, structure, mechanical properties, crack resistance

For citation: Zhadyaev A.A. Physical and mechanical properties of WC-Cocemented carbides of roller cone bits with inhomogeneous structures. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.6 (132), pp. 3-11. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-3-11

Введение

В твердых сплавах с момента их открытия и использования обнаруживались неоднородности и различия по качеству. Продукция, изготовленная из одного и того же сплава, в одинаковых условиях эксплуатации имела раз-

личия по качеству. Продукция, изготовленная из одного и того же сплава, в одинаковых условиях эксплуатации имела различие по стойкости в несколько раз. Это объясняется различием параметров спекания, однородности сплава и размера частиц.

Производство вольфрамкобальтовых

изделий – сложный технологический процесс, с большим числом (> 20) технологических операций, каждая из которых может влиять на физико-механические свойства и однородность структуры [1].

Хранение исходных компонентов, изготовление смесей из них, формование, спекание в вакууме, механообработка – требуют соблюдения чистоты и условий на каждой операции. Даже небольшие отклонения по химическому составу могут привести к резкому снижению прочностных свойств, преждевременным сколам и разрушению твердосплавного вооружения во время бурения.

На протяжении последних 25-ти лет глубокое изучение влияния параметров различных технологических операций и оборудования на свойства твердых сплавов позволили значительно снизить степень неоднородности сплавов, но окончательно избавиться от нее до сих пор не удалось [2]. Основной задачей является соблюдение требуемого состава сплава во время спекания в вакууме.

Выход из строя бурового инструмента за счет разрушения твердосплавных зубков нередко обусловлен наличием различных дефектов вольфрамокобальтового сплава, имеющие различное происхождение и не выявленные своевременно. Некоторые дефекты могут привести к разрушению зубков даже в процессе запрессовки в тело шарошки. Поэтому важной задачей является тщательный контроль качества изделий в партии в момент лабораторных исследований и производственных испытаний.

Целью данного исследования является анализ типичных дефектов микроструктуры сплавов WC-Co, используемых в производстве твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот, описание причин их возникновения. Анализ влияния дефектов структуры на физико-механические свойства и трещиностойкость твердого сплава.

Одним из возможных дефектов (неоднородностей) структуры вольфрамо-кобальтовых сплавов в процессе производства могут быть: крупные кристаллы карбида вольфрама и их скопления; компаундирование (скопление кобальта (β -фазы)); пористость; свободный углерод; η -фаза (двойной карбид W_3Co_3C); сегрегация WC.

Повысить однородность и эксплуатационные свойства изделия из одной и той же марки сплава после спекания можно путем устранения неоднородности по содержанию углерода [3].

Основные явления изнашивания и деградации WC-Co сплавов в условиях повышенных нагрузок и температур в момент разрушения горных пород отражены в работе [4].

Эксплуатационные свойства вольфрамокобальтового инструмента в основном характеризуются их износостойкостью и прочностью. Определяющими характеристиками являются прочность и трещиностойкость.

Режим при резании металлов или нагрузку при бурении ограничивает недостаточная прочность WC Co сплавов, что требует подбора для каждого процесса необходимой марки сплава, которая обладает необходимой прочностью без ущерба износостойкости. Это уменьшает преждевременный износ инструмента при работе. О назначении и качестве инструмента из вольфрамокобальтовых сплавов предварительно судят по физико-механическим свойствам и трещиностойкости, полученным при лабораторных испытаниях.

Трещиностойкость – эксплуатационная характеристика, измерение которой позволяет оценить сопротивление материала распространению трещины и разрушению. В случае со сплавами WC-Co, применяемыми для зубков буровых долот, именно критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} или значение вязкости разрушения при плоской деформации, которую измеряют как вязкость разрушения по Палмквисту Wk ($MH \cdot m^{3/2}$) лучше всего говорят о потенциале материала сопротивляться разрушению [5]. Для вольфрамокобальтовых сплавов трещиностойкость линейно возрастает с ростом содержания кобальта от 5 до 20 % масс. и находится в диапазоне 9... 23 $MH \cdot m^{3/2}$.

Анализ причин износа и выхода из строя буровых долот, связанных с дефектами твердосплавного вооружения показывает, что проблема обеспечения высокой трещиностойкости зубков является одной из наиболее актуальных и требующей изучения.

Материалы

На предприятии АО «Волгабурмаш» (АО «ВБМ»), г. Самара, Россия, при изготовлении долот для бурения пород различной твердости с твердосплавным вооружением используются сплавы ВК6С, ВК10С и ВК15С с содержанием 6 %, 10 % и 15 % Со соответственно (здесь и далее приводятся % масс.).

Физико-механические свойства сплавов должны соответствовать требованиям стан-

дарта предприятия СТП-582-17 АО «Волгабурмаш». При исследовании в таблицах для каждого дефекта будут представлены ранее полученные средние значения параметров физико-механических свойств и трещиностойкости серийных сплавов, с которыми будет происходить сравнение.

На рис. 1 представлена микроструктура сплавов, сделанная с использованием растрового электронного микроскопа JeolJSM 6390А при увеличении $\times 5000$.

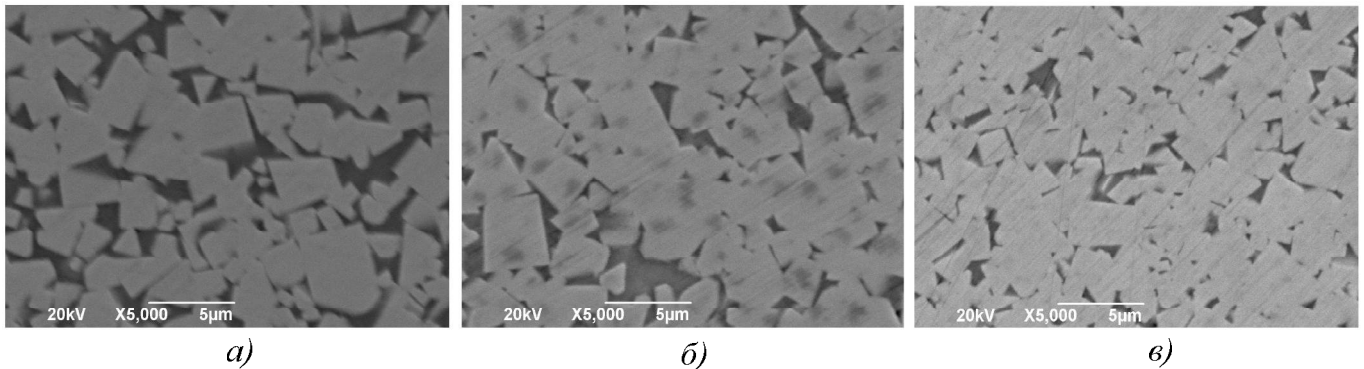


Рис. 1. Фотографии микроструктуры серийных сплавов АО «Волгабурмаш»:

а – ВК6С; б - ВК10С; в – ВК15С, $\times 5000$

Плотность образцов измеряли по ГОСТ 20018-74 (ASTM В311-58, ISO 3369). Предел прочности твердых сплавов при поперечном изгибе определяли по ГОСТ 20019-74 (ISO 3327:2009). Значение коэрцитивной силы сплавов определяли на приборе LDJCOERCIMETERcm-800 в соответствии с ГОСТ 24916-81 (ISO 3326:2013). Значение твердости спеченных образцов измеряли по шкале Роквелла HRA согласно ГОСТ 25172-82 (ISO 3738-1).

Определение трещиностойкости производили согласно стандарту ISO 28079:2009, на основе результатов измерения длины трещин, образующихся около углов отпечатков пирамиды Виккерса после индентирования шлифа. Металлографический метод исследования микроструктуры твердых сплавов проводили по ГОСТ 9391-80 (ISO 4499) с помощью оптического микроскопа «Ахiotech» 100 HD 3D CarlZeiss (Германия). Для более детального изучения поверхности и характера распространения трещины использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) Jeol JSM 6390А как один из наиболее универсальных методов для исследования и анализа микроструктуры твердых тел.

Методы исследования

Крупные кристаллы карбида вольфрама и их скопления. Крупные зерна карбида вольфрама, размер которых в три и более раз превышает средний размер таковых, должны отсутствовать в микроструктуре WC-Co сплавов [2].

Образование дефекта зависит от двух основных факторов: от выбора порошкового сырья (в основном порошка карбида вольфрама) и режимов спекания. Присутствие порошка WC, как мелкой фракции, так и крупной фракции не желательно в одной смеси.

Мелкая фракция WC при спекании перекристаллизуется на участках с крупными зернами с образованием агломератов кристаллов, размер которых зависит от размера зерен в исходной смеси, температуры, времени выдержки и скорости охлаждения при спекании.

Спекание следует проводить при оптимальной температуре, с соблюдением скорости нагрева, чтобы не допустить неравномерный рост и образование крупных кристаллов и их скоплений.

В сплавах с более высоким содержанием

связующего (Co) происходит не только увеличение средних размеров зерна WC, но и количества крупных зерен. Повышенное содержание углерода в исходном карбиде вольфрама вызывает рост зерен WC при спекании. Это объясняется различным содержанием жидкой фазы в условиях спекания.

Вышесказанное приводит к снижению механических и эксплуатационных свойств сплава.

В научных работах описаны различные подходы, позволяющие не допустить появления крупных кристаллов и их скоплений в структуре вольфрамокобальтовых сплавов. Они заключаются в применении метода многостадийного спека -

ния [6], иной технологии изготовления карбида вольфрама [7], использования в процессе спекания азота [8]. При анализе распространения трещин в вольфрамокобальтовых сплавах выявлено, что крупные зерна разрушаются быстрее чем мелкие, из этого следует, что наличие крупных зерен WC и их скоплений в изделиях снижает их эксплуатационные характеристики.

Оба описанных выше дефекта являются нежелательными, так как вызывают неравномерное распределение свойств в объеме сплава.

Дефекты «крупный кристалл» и «скопления кристаллов» представлены на рис. 2.

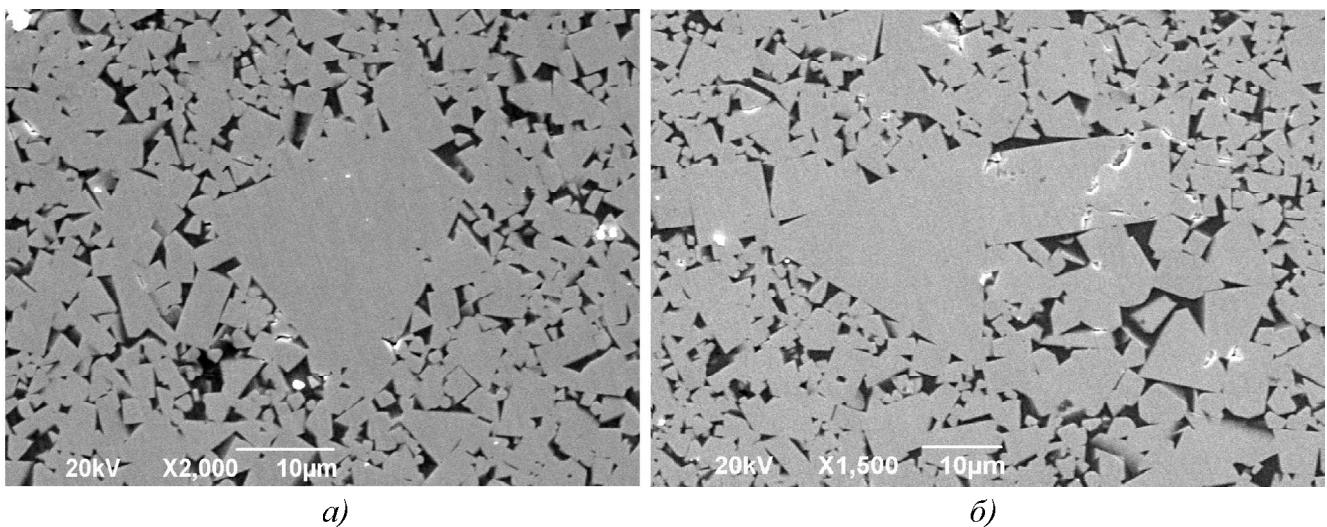


Рис. 2. Дефекты «крупный кристалл» (а) и «скопления кристаллов» (б), $\times 1500$

Микроструктура образца с большими кристаллами имеет пористость A1 и отдельные большие кристаллы размером до 95 мкм. Структура образца со скоплением кристаллов имеет семь участков скопления кристаллов с суммарным размером 455 мкм и размером наибольшего 65 мкм. Технические требования СТП-582-17 АО «Волгабурмаш» регламентируют не допускать в работу изделия, имеющие отдельные кристаллы размером более 35 мкм и скопления кристаллов общим размером зоны больше 250 мкм.

Компаундирование (скопление кобальта (β -фазы)). Основной причиной неравномерного распределения связующего в твердом сплаве является плохое перемешивание компонентов твердосплавной смеси.

При появлении «кобальтовых озер», большой концентрации связующего в определенной зоне сплава, свидетельствует о том,

что где-то имеются места, обедненные кобальтом. Такая неоднородность распределения кобальта приводит к снижению прочностных свойств сплава под нагрузками. По результатам исследований при циклическом воздействии, зубки с неравномерным распределением кобальта имели низкие показатели, так как трещины распространяются в основном по связующему, так как это более пластичная среда по сравнению с карбидом вольфрама, что тормозит их развитие.

Следовательно, в местах где недостаточное содержание кобальта или он полностью отсутствует с большей вероятностью может произойти зарождение и распространение трещины под нагрузкой.

На рис. 3 представлено изображение дефекта компаундирования сплава BK10C (WC 10 % Co) при увеличении $\times 1500$.

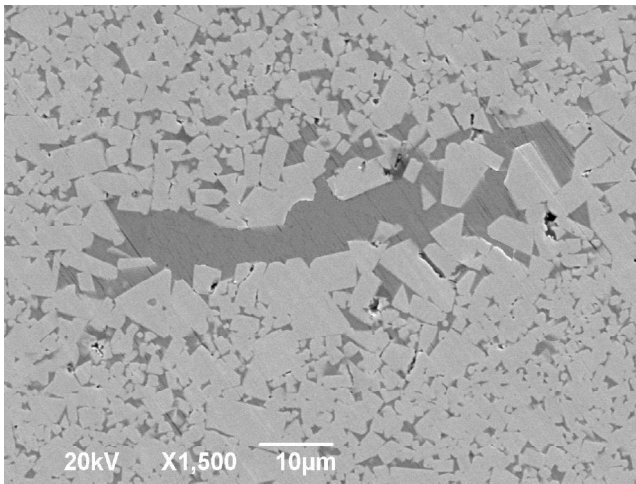


Рис. 3. Компаундирование, сплав ВК10С (Со 10 %), $\times 1500$

Микроструктура имеет пористость типа А4. Четыре участка компаундирования суммарным размером 383 мкм, размер наибольшего 57 мкм, а также поры 35 мкм. По СТП-582-17 АО «Волгабурмаш» такие отклонения не допускаются.

Пористость и свободный углерод. Одной из главных задач в производстве твердых сплавов является создание спеченных изделий с минимальной пористостью. Любая пористость в структуре WC-Co, особенно углеродная, является концентратором напряжений. Это резко снижает эксплуатационные характеристики инструмента.

Концентрация напряжения на границах пор, имеющих малый размер, приравнивает их к микротрещинам этим обусловлено их основное влияние на снижение прочности сплава. Поры, размер которых 25 мкм уже считаются крупными [2].

Основными факторами образования пор являются: загрязнение порошков (попадание в смесь пыли, краски, волос, частиц бетона, металла и др.); недостаточный размол зерен; неоднородность материала (неравномерное распределение кобальта вследствие плохого перемешивания); недоспекание и недопрессование заготовок; присутствие избыточного углерода в свободном виде и в атмосфере печи спекания; проникновение углерода с поверхности графитового поддона и др. Это приводит к образованию пор и неоднородности содержания углерода в изделии и снижению эксплуатационных свойств.

На рис. 4 представлены поры в сплаве ВК10С (Со 10 %).

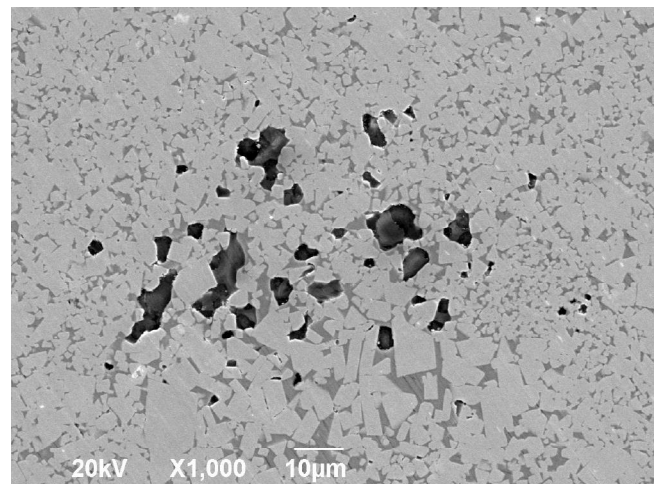


Рис. 4. Поры в сплаве ВК10С (Со 10 %), $\times 1000$

Одной из многочисленных публикаций, по изучению влияния содержания углерода на физико-механические свойства вольфрам-кобальтовых сплавов, наиболее важной является работа авторов Suzuki H. и Kubota H. [9].

Анализ результатов данного исследования демонстрирует, что предел прочности при поперечном изгибе снижается за пределами двухфазной области, т.е. в результате появления либо η -фазы, либо свободного углерода в микроструктуре.

Спекание под высоким давлением (газостатирование) позволяет снизить общую пористость сплава в несколько раз и убрать отдельные крупные поры в структуре.

На рис. 5 изображена микроструктура поверхности сплава ВК10С со свободным углеродом при увеличении $\times 2000$. Пористость образца классифицируется как С3.

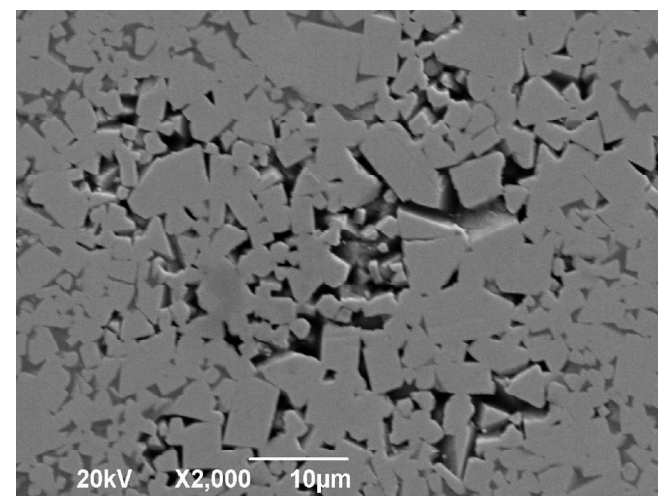


Рис. 5. Свободный углерод, сплав ВК10С (Со 10 %), $\times 2000$

Основными методами избавления от пористости в вольфрамокобальтовых изделиях являются: горячее изостатическое пресование (газовые включения растворяются в β фазе при высоких температурах и давлении) и повышение качества работы и чистоты производства (отдельные помещения; спецодежда; очистка воздуха; тщательная уборка; избыточное давление воздуха; температура в цеху не 20°C).

Микроструктура имеет пористость типа С3 и отдельные большие поры размером до 105 мкм. По СТП-582-17 АО «Волгабурмаш» такие отклонения не допускаются.

η -фаза (двойной карбид W_3Co_3C). Прочность сплава при поперечном изгибе максимальна в двухфазной области вблизи «низуглеродистой» границы. С появлением η_1 -фазы (двойной карбид W_3Co_3C) этот показатель резко падает [10].

В момент спекания, из-за высокой скорости нагрева и малым временем выдержки, восстановление оксидов Co газами печи происходит лишь на небольшую глубину сплава. Восстановление оксида во внутренних слоях изделия происходит за счет углерода WC, это приводит к обезуглероживанию сплава и образованию хрупкой фазы отвечающей формуле Co_3W_3C (η -фаза).

Разница по содержанию углерода в поверхностных слоях и в середине изделия зависит от объема изделия и дефицита углерода в исходной смеси.

Наличие η -фазы на шлифах сплава может представлять из себя вид «кружев» и «озерков».

Образование таких дефектов как: двойной карбид Co_3W_3C и свободный углерод, можно избежать путем регулирования содержания общего углерода в исходных порошках WC и Co, а также используя специальные операции нормализующего спекания. Происходит насыщение углеродом до одного уровня всех изделий, в результате этого после окончательного спекания в инертной среде, двухфазные сплавы приобретают износоустойчивость, близкую к минимальной, а прочность – приближающуюся к максимальной для двухфазных сплавов.

Науглероживание вольфрамокобальтовых сплавов обычно проводят с использованием газов на основе водорода, метана или других углеводородов, а обезуглероживание – в водороде или CO_2 .

Произвести науглероживание изделия с помощью газа или спекания в нормализующей засыпке можно вплоть до максимального насыщения жидкой фазы углеродом, однако

это требует продолжительной выдержки [2].

На АО «Волгабурмаш» применяется полный цикл спекания зубков, который включает предварительное спекание, спекание в вакууме и спекание с подачей газостатического давления, что позволяет практически полностью исключить образование η -фазы.

На рис. 6 представлено изображение η фазы сплава BK6C (WC 6 % Co) после травления при увеличении $\times 1000$.

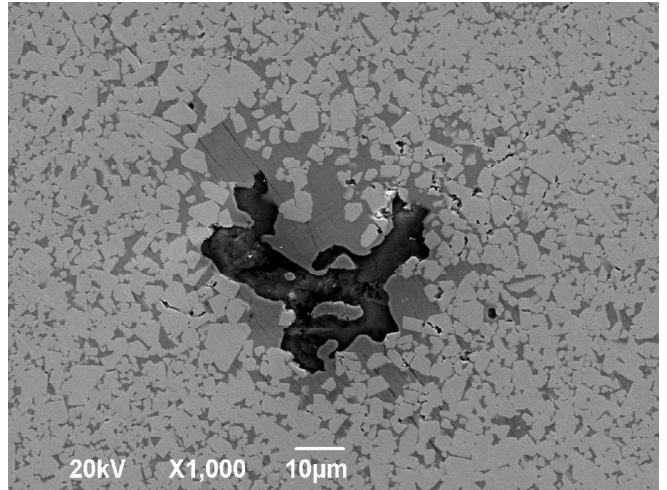


Рис. 6. η -фаза BK6C (Co 6 %), $\times 1000$

Микроструктура имеет пористость типа С2 и η -фазу в трех участках суммарным размером 48 мкм. По СТП-582-17 АО «Волгабурмаш» такие отклонения не допускаются.

Сегрегация WC. Сегрегации является нежелательным дефектом вольфрамокобальтового сплава и нередко обнаруживается в структуре в виде темных или светлых областей (зон) различной формы и размеров. Данная область имеет отличительную от основной части материала дисперсность зерен, это видно даже при небольших увеличениях.

Поэтому правильнее называть сегрегацию – загрязнением другим сортом сплава, который возник в процессе производства.

Дефект может возникнуть из-за плохой очистки оборудования, после перехода на другой сорт сырья, например, аттриторов, промежуточных ёмкостей, а также самой установке суши распылением и её рабочей зоны.

Зоны сегрегации отличаются по физико-механическим свойствам от структуры основного изделия, поэтому её наличие нежелательно в сплаве.

В табл. 1 приведены исследуемые характеристики образцов с различными дефектами.

1. Физико-механические свойства исследуемых образцов с различными дефектами

Образец	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Коэрцитивная сила Нс, Э	Предел прочности при поперечном изгибе, кгс/мм ²	Средний размер зерна, мкм	Вязкость разрушения по WK, МН·м ^{-3/2}	Средняя длина трещины, мкм
1. Образцы с дефектом «крупный кристалл» и «скопление кристаллов»							
Серийный BK10C	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
Большой кристалл	14,53	87,4	80	251	3,0	16,5	82
Скопление кристаллов	14,51	87,2	85	247	2,9	16,9	85
2. Образцы с дефектом «компаундирование»							
Серийный BK10C	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
Компаундирование BK10C	14,53	86,8	87	250	2,6	16,3	95
3. Образцы с дефектом «поры и свободный углерод»							
Серийный BK10C	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
Поры и свободный углерод BK10C	14,41	87,8	87	251	2,7	17,5	88
4. Образцы с дефектом η-фаза							
Серийный BK6C	14,91	90,3	132	242	2,2	13,1	99
η-фаза	14,92	91,2	81	258	2,7	10,9	141
5. Образцы с дефектом «сегрегация WC»							
Серийный BK10C	14,51	88,3	77	296	2,6	17,1	82
Сегрегация WC	14,52	89,3	74	236	2,3	18,4	74
Примечание: выделенное значение имеет отклонение от требований СТП582 АО «ВБМ».							

На рис. 7 представлено изображение дефекта «сегрегация WC» в сплаве BK10C (WC 10 % Co).

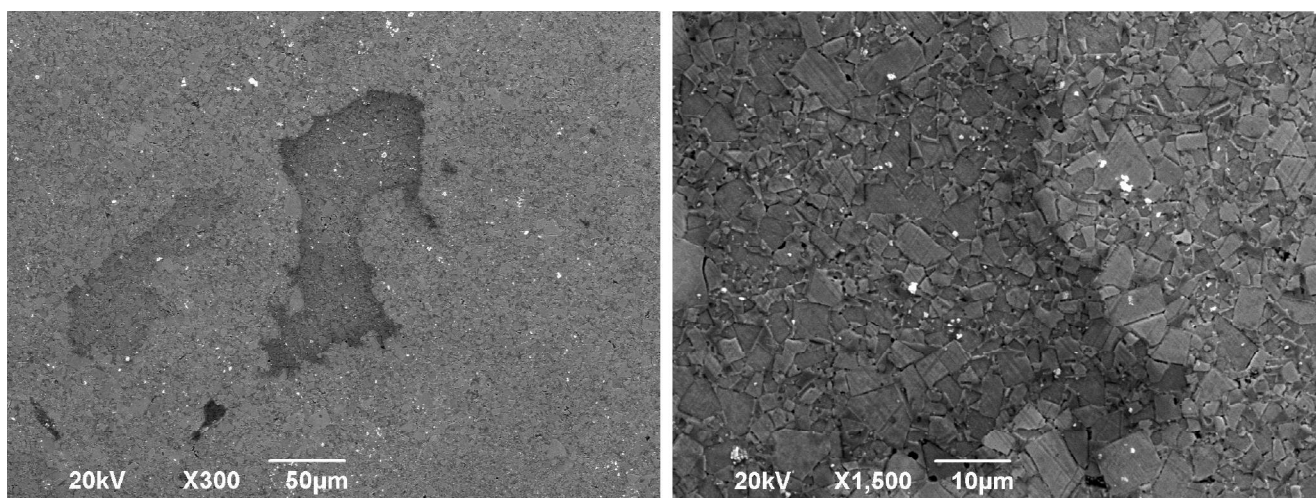


Рис. 7. Сегрегации WC сплав BK10C (WC 10 % Co), ×300 и ×1500

Микроструктура имеет пористость типа С1 и зону сегрегации размером 91 мкм. СТП-582-17 АО «Волгабурмаш» не допускают наличие сегрегации в микроструктуре вольфрамкобальтовых сплавов.

На рис. 8 и 9 приведены диаграммы сравнения свойств всех дефектов с серийными образцами.

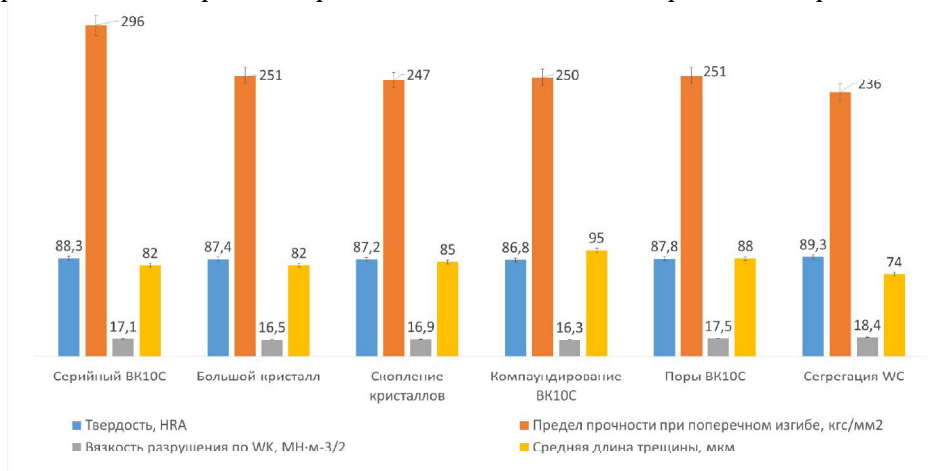


Рис. 8. Гистограмма свойств образцов из сплава VK10C

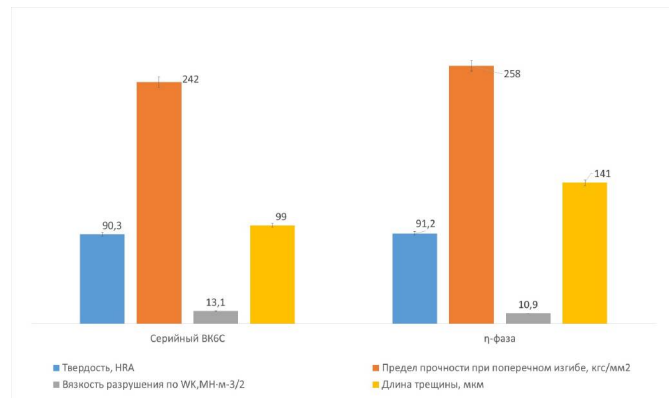


Рис. 9. Гистограмма свойств образцов из сплава VK6C

Заключение

По результатам проведенных исследований, сделаем вывод, что наличие данных дефектов микроструктуры сплава ухудшает комплекс свойств вольфрамкобальтового сплава, таких как: прочность на поперечный изгиб, твердость и трещиностойкость. Характеристики представленных образцов не соответствуют требованиям годной продукции предприятия, это требует их отбраковки или проведение мероприятий по устранению отклонений.

Анализ распространения трещин показал, что разрушение происходило в основном по межфазной области, по кобальтовой связке. Это считается более предпочтительной моделью разрушения, т.к. когда трещина проходит по границам зерен карбида вольфрама или через, раскалывая их – происходит неполный ресурс работы разрушения сплава. Поэтому дефект «большой кристалл» и «скопление кристаллов» являются концентраторами напряжений в структуре,

облегчая процесс распространения трещины. Дефект «компаундирования» при скоплении кобальта в одной точке образует обедненные соседние области сплава, что ослабляет связку между зернами WC и соответственно упрощает распространение трещины. Наличие η фазы и свободного углерода также является концентраторами напряжения и охрупчивают структуру вольфрамкобальтового сплава. Высказывания выше подтверждаются низким значением трещиностойкости полученными в процессе исследований. Таким образом, следует больше внимания уделять контролю качества на производственных операциях. Работа над качеством продукции влияет на проблему долговечности и конкурентоспособности буровых долот. В условиях острой конкуренции на рынке твердо-сплавного инструмента актуальным является совершенствование состава, структуры и технологии производства сплавов, а также повышение их износостойкости и трещиностойкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Norgren, S., García, J., Blomqvist, A., Yin, L. Trends in the P/M hard metal industry // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, Vol. 48, PP. 31-45.
2. Zhadyaev, A.A., Zakharov, D.A., Amosov, A.P., Novikov, V.A. Comparative analysis of physical and mechanical properties of hard alloy products depending on the synthesis mode. AIP Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 29-30 April 2021 // Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 20-56.
3. Панов, В.С., Кonyaшин, И.Ю., Левашов, Е.А., Зайцев А.А. Твердые сплавы: учебник. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 398 с.
4. Beste, U., Jacobson, S. A new view of the deterioration and wear of WC/Co rock drill carbide buttons // Wear, 2008, Vol. 264, P. 1129-1141.
5. Дефекты и повреждения деталей и конструкций: монография / В.М. Кушаенко, В.С. Репях, Е.Ю. Чирков, Е.В. Кушнаренко, Оренбургский гос. ун-т: – Оренбург: ОГУ, 2011. – 402 с.
6. Yang, D.Y., Kang, S.J. Suoeresion of abnormal grain growth in WC-Co via presintering treatment // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, Vol. 27, P. 90-94.
7. Konyashin, I., Eschner, T., Aldinger, F., SENCHIHIN, V. Cemented Carbides with Uniform Microstructure // Z. Metallkd, 1999, Vol. 90, P. 403-406.
8. Нассиф, Н.С., Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостного разрушения твердых сплавов // Вестник СГАУ им. С.П. Королёва. – 2006. – № 22 (10). – С. 228-233.
9. Suzuki, H., Kubota, H. The influence of binderphase composition on the properties of tungsten carbide-cobalt cemented carbides // Plansee - berichtefuer Pulvermetallurgie, 1966, №14 (2), P. 96-109.
10. Решетняк, Х.Д. Структура и свойства твердых сплавов, спеченных в вакууме. Порошковая металлургия и области её применения. Тезисы докладов к зональному семинару. Ред Г. В. Семенова. – Пенза, 1990. – С. 62-63.

REFERENCES

1. Norgren, S., García, J., Blomqvist, A., Yin, L. Trends in the P/M hard metal industry, Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 48 (2015) 31–45 DOI: doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.007
2. 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 Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года / Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 20-56. – DOI 10.1063/5.0071653.
3. Panov, V., Konyashin, I., Lovashov, E., Zaitsev, A. Hard alloys: textbook / V.S. Panov [i dr.], - 3rd ed., add. and reworked. – М.: Ed. House of NUST MISIS, 2019. - 398 p.
4. Beste U., Jacobson S. A new view of the deterioration and wear of WC/Co rock drill carbide buttons // Wear 264. 2008. P. 1129-1141.
5. Defects and damage to parts and structures: monograph / V.M. Kushaenko, V.S. Repyakh, E.Yu. Chirkov, E.V. Kushnarenko; Orenburg state. un-t: - Orenburg: OGU, 2011. - 402 pp.
6. Yang D.Y., Kang S.J. Suoeresion of abnormal grain-growth in WC-Co via presintering treatment // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2009. №27. P. 90-94.
7. Konyashin I., Eschner T., Aldinger F., SENCHIHIN V. Cemented Carbides with Uniform Microstructure // Z. Metallkd. 1999. № 90. P. 403-406.
8. Nassif N.S., Ibatullin I.D. Kinetics of fatigue failure of hard alloys // Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva, Samara, 2006, No. 2, part 2.
9. Suzuki H., Kubota H. The influence of binder phase composition on the properties of tungsten carbide-cobalt cemented carbides // PlanseeberichtefuerPulvermetallurgie. 1966. № 14(2). P. 96-109.
10. Reshetnyak H.D. Structure and properties of hard alloys sintered in vacuum. Powder metallurgy and its applications. Abstracts of reports for the zonal seminar. Red G.V. Semenov. Penza 1990 pp. 62-63.

Статья поступила в редакцию 02.05.2022; одобрена после рецензирования 11.05.2022; принята к публикации 13.05.2022.

The article was submitted 02.05.2022; approved after reviewing 11.05.2022; assepted for publication 13.05.2022.

