

DOI: 10.18721/JEST.27206

УДК 621.672

*Е.С. Козик, С.И. Богодухов,
Е.В. Свиденко, И.В. Руднев*Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия**ТЕРМООБРАБОТКА СПЛАВА ВК4**

В работе проводили изучение влияния многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки на физико-механические и эксплуатационные характеристики твердых сплавов. В качестве исходного материала использовали сплав ВК4 (неперетачиваемые 4-х гранные пластины и штабики размером 5×5×35 мм). Были определены физико-механические свойства исходных твердых сплавов WC-Co (VK4). Затем проводили поисковые работы по 11 режимам термической обработки в соляных ваннах. В каждом режиме исследовали по 10–15 пластин. После проведения поисковых исследований установили этапы и структурные изменения в процессе двукратной термообработки спеченных твердых сплавов. Физические свойства твердого сплава ВК4 после термической обработки практически не изменились (увеличилась в 2 раза коэрцитивная сила), однако отмечено увеличение на 10–30 % предела прочности при сжатии и твердости. В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: твердый сплав ВК4, износ при резании, физико-механический свойства, соляные ванны, стойкость.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В., Руднев И.В. Термообработка сплава ВК4 // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 73–83. DOI: 10.18721/JEST.27206

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov,
E.V. Svidenko, I.V. Rudnev*Orenburg State University,
Orenburg, Russia**HEAT TREATMENT OF VK4 ALLOY**

In this work, we studied the effect of multiple, stepwise hardening with intermediate tempering on the physical, mechanical and operational characteristics of hard alloys. Alloy VK4 was used as the initial material (non-resurfacing 4-sided plates and sticks with a size of 5×5×35 mm). The physical and mechanical properties of the initial hard alloys WC-Co (VK4) were determined. Then, prospecting work was carried out on 11 modes of heat treatment in salt baths. In each mode, 10–15 plates were examined. After conducting prospecting studies, the stages and structural changes in the process of double heat treatment of sintered hard alloys were established. The physical properties of the VK4 hard alloy after heat treatment practically did not change (the coercive force increased by 2 times), however, an increase of 10–30% in ultimate strength in compression and hardness was noted. As a result of the tests carried out, it was found that the plates treated by the proposed methods of heat treatment increased their durability by 1.5–2 times.

Keywords: hard alloy VK4, cutting wear, physical and mechanical properties, salt baths, durability.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, E.V. Svidenko, I.V. Rudnev, Heat treatment of VK4 alloy, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 73–83, DOI: 10.18721/JEST.27206

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. На структуру твердых, сплавов могут влиять самые разнообразные факторы. Количественное соотношение компонентов твердых сплавов, эксплуатационные, физико-механические свойства каждой структурной составляющей. Температура, защитная атмосфера спекания (процесс взаимодействия с влажным, осушенным водородом или конвертированным газом) и скорость охлаждения после спекания. Деформация и напряжения между фазами твердого сплава при различных видах упрочнения твердых сплавов, взаимодействие карбидных фаз твердых сплавов с обрабатываемыми материалами [1, 9].

Но влияние этих факторов, как отдельно, так и в совокупности можно направить по желаемому направлению, оказывая влияние на них, а, следовательно, получая нужную структуру [2–8].

Основными элементами структуры твердых сплавов влияющих на износостойкость твердосплавных пластин являются:

- 1) фазовый состав;
- 2) величина карбидных зерен;
- 3) наличие «кольцевой структуры»;
- 4) пористость.

Фазовый состав, который идентифицируется наличием определенных фаз, имеющими разную твердость и прочность, которые будут зависеть от степени растворения одних фаз в других, а это, в свою очередь, вызвано их кристаллическим строением, видом элементарной и примитивной решеток, силой связи между атомами, электронным строением, а также внешними условиями получения фазового состава, например: скоростью охлаждения, наличием свободного углерода, величиной зерен исходных смесей, условиями спекания, средой, в которой производят спекание. Таким образом, изменяя внешние условия, можно влиять на элементы структуры сплавов, на саму структуру, а, следовательно, и на режущие свойства сплавов. Поэтому можно считать естественным, что существует такой вид термической обработки [10], который влияя на физические, технологические свойства изменяет микроструктуру твердого сплава и тем самым влияет на эксплуатационные свойства, то есть на режущие свойства и стойкость.

Необходимо только доказать, что эти свойства сплава не достигают своих оптимальных значений при принятом методе спекания, иначе говоря, существующий метод получения твердых сплавов, который не обеспечивает получения лучших режущих свойств. Но их можно было бы достигнуть, применяя иной метод термической обработки [11, 12].

Современные методы спекания твердых сплавов имеют под собой одностороннюю основу. Все они базируются на недопущении в структурный состав сплава «хрупких фаз», то есть таких фаз, которые снижают прочность, твердость и другие физико-механические свойства. При определенных условиях спекания могут быть достигнуты желаемые результаты. Таким образом, автоматически, исключая возможность появления хрупких фаз (пусть даже теоретически), отбрасывают заранее такие условия термообработки, которые могли бы привести к возникновению этих «хрупких» фаз. Проводившиеся до сих пор методы термической обработки твердых сплавов, хотя и давали некоторое повышение их свойств, но незначительное [13–15]. Целью работы является изучение влияния многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки на физико-механические и эксплуатационные характеристики твердых сплавов состава: 96 %; W 4% Co.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали сплав ВК4 (неперетачиваемые 4-х гранные пластины и штабики размером 5×5×35 мм).

Определили физико-механические свойства исходных твердых сплавов WC-Co (BK4): плотность сплавов, теплопроводность, удельную теплоемкость, коэффициент линейного расширения, электрическое сопротивление, твердость, предел прочности при изгибе.

Плотность сплавов WC-Co, при содержании кобальта 4%, в пределах 15,0 г/мм³. Теплопроводность – в пределах 0,1-0,16 кал/(см·с·град). Удельная теплоемкость для сплавов WC-Co лежит в пределах 0,035-0,05 кал/(г·град) при температуре до 100 °С и увеличивается примерно до 0,07-0,08 при 1000 °С. Коэффициент линейного расширения – $6 \cdot 10^{-6}$. Электрическое сопротивление сплавов составляет около 19 мк·Ом·см. Из магнитных свойств сплавов была определена величина коэрцитивной силы. Твердость сплавов WC-Co по Виккерсу составляет 1100-1700 Н/мм². Определяли предел прочности при сжатии по ГОСТ 20019-74.

В табл. 1 приведена последовательность процесса проведения термической обработки твердого сплава ВК4 при нагреве в соляных ваннах [6].

Таблица 1

Процесс термической обработки при нагреве в соляных ваннах

Table 1

The process of heat treatment when heated in salt baths

Операции	Среда	Температура, °С	Время, мин
Предварительный нагрев	соляная ванна предварительного нагрева 80-85 % BaCl ₂ + 20-15 % NaCl	800	2
Окончательный нагрев	соляная ванна окончательного нагрева 100 % BaCl ₂	950-1150	4
Закалка	масло И-20	40-60	5
Нагрев при отпуске	50 % KNO ₃ +50 % NaNO ₂	250-500	15
	соляная ванна Н-495	600	15
Отмывка	вода	95	3
Нейтрализация	3 % раствор HCl в воде	20	3-6
Промывка	вода	80-100	3-6
Сушка	воздух	90-100	3-6

Результаты

Проводились поисковые работы по 11 режимам термической обработки в соляных ваннах. Пластины подверглись дополнительной термообработке по 10 вариантам, а в 11-й партии использовались пластины в исходном состоянии, то есть без термообработки. В каждом опыте принимались по 10–15 пластин.

Варианты термической обработки были следующие:

1) пластины подвергались предварительному нагреву под закалку 800 °С с выдержкой при этой температуре в течении 2 мин, с последующим окончательным нагревом до 1150 °С и выдержкой в течении 4 мин, затем закалка в масле при температуре 60 °С и отпуск на автоматической линии (АЛ) при температуре 600 °С и выдержкой в течении 10 минут (800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин);

2) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, отпуск на АЛ $600\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$, отмывка;

3) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

4) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ изотермическая закалка (ИЗ) $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$, с последующим охлаждением в воде;

5) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, ИЗ $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$; вторичная закалка $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, ИЗ $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

6) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

7) $880\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, отпуск $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

8) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ отпуск на АЛ $600\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

9) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

10) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ ИЗ $60\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин} \rightarrow$ отмывка в воде и вторичная закалка $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ ИЗ $560\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

Пластины, прошедшие дополнительную термообработку (по 10 вариантам), и пластины в исходном состоянии подвергались стойкостным испытаниям на токарно-винторезном станке 1К62 при поперечном точении заготовок $\varnothing 200\text{ мм}$ и внутренним $\varnothing 25$ из стали 50. Точение осуществлялось от центра к периферии без применения СОЖ, по 20 проходов (рис. 1). Резец с неперетачиваемой пластиной устанавливался по линии центров станка, вылет его из резцедержателя принимался не более двойной высоты державки. Геометрические параметры следующие: передний угол 15° , задний 12° , радиус при вершине $0,5\text{ мм}$ [9]. Условия испытания следующие:

Частота вращения n , мин^{-1}	630
Подача S , мм/об	0,11
Глубина резания t , мм	2

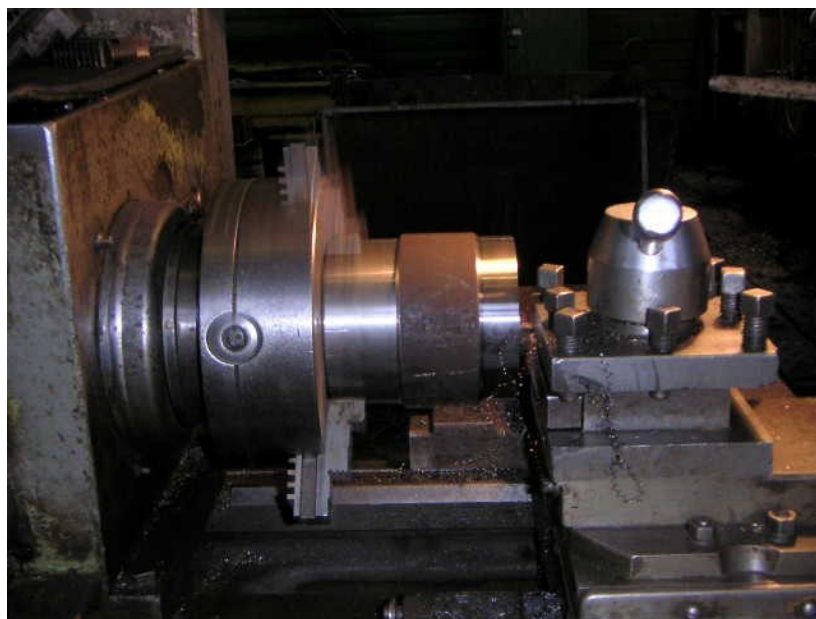


Рис. 1. Испытания твердосплавных пластин VK4

Fig. 1. Testing of hard-alloy plates VK4

Наименьший износ пластин наблюдался при использовании резцов, термообработанных по вариантам 1, 9, 10. Средние значения твердости и износа пластин для этих режимов приведены в табл. 2.

Таким образом, для внедрения в производство рекомендуются следующие три режима термической обработки:

- 1) режим 1, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин;
- 2) режим 9, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С;
- 3) режим 10, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин → ИЗ 60 °С – 10 мин → отмывка в воде и вторичная закалка 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин → ИЗ 560 °С – 10 мин.

Таблица 2

Сводная таблица данных по твердости и износу при резании для лучших режимов

Table 2

Summary table of cutting hardness and wear data for the best cutting modes

№ режима	Твердость HV	Относительный поверхностный износ		Интенсивность износа	
		по уголку $h_{от\ ут}$, мкм/м ²	задней поверхности $h_{от\ з}$, мкм/м ²	угловая $\varepsilon_{уг}$, км/мин	по задней поверхности $\varepsilon_{уг}$, мкм/мин
Исходные	1160	15821	22500	209	297
Режим 1, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин	1752	14642	20105	193,4	264
Режим 9, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С	1687	15355	21606	202,8	287
Режим 10, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин → → ИЗ 60 °С – 10 мин → → отмывка в воде и вторичная закалка 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин → → ИЗ 560 °С – 10 мин	1708	15178	21071	200,5	278

Обсуждение

В экспериментальной работе установлены этапы и структурные изменения в процессе двукратной термообработки спеченных твердых сплавов.

1) При первичном нагреве спеченных пластин происходит ослабление удерживающих связей в фазах $\eta_2 - W_6Co_6C$ и $\varepsilon_2 - Co_3W_2C_2$.

В результате за время поддержания заданной температуры происходит частичное диффузионное растворение этих фаз в других составляющих. Таким образом, увеличивается процент чистого кобальта. В результате нагрева фаза η_2 , (поскольку увеличилось содержание кобальта) начинает диффундировать к поверхностям карбидов. Таким образом возрастает прочность и твердость сплава. Чтобы не допустить обратного процесса сплав быстро охлаждается (закаливается) в масле.

2) В результате первой закалки мы получили повышение твердости к прочности сплава за счет диффундирования $\eta_2 - W_6Co_6C$ и $\varepsilon_2 - Co_3W_2C_2$ фаз. Однако в результате быстрого охлаждения

между зёрнами карбидов возникли напряжения, которые могут явиться причинами выкрашивания и поломок пластин в момент резания. Поэтому с целью снятия этих напряжений проводится 15-ти минутный отпуск сплава.

3) Следующим этапом является вторичная закалка. Температура ее ниже температуры нагрева под первую закалку порядка 200 °С. Это необходимо для того, чтобы исключить возможность появления η_1 , η_2 и ε -фаз. При температуре второй закали карбид вольфрама в очень малом количестве растворяется в кобальте.

Таким образом, возникает структура, которая оказывает положительное влияние на режущие свойства, увеличивая их до 3-х раз (имеется в виду стойкость) за счет более равномерной по физико-механическим свойствам структуры: ввиду растворимости WC в Co несколько повышается твердость связки без изменения прочностных (вяжущих) ее свойств. Время второй закали равно времени первой закали, и поэтому диффузия карбидных составляющих в связку не могут произойти.

Чтобы закрепить полученные свойства, проводят быстрое охлаждение в масле.

4) Для того, чтобы снять вновь возникающие в процессе второй закали напряжения, проводится вторичный отпуск. Но температура этого отпуска должна быть обязательно меньше 417 °С – температуры при которой начинается полиморфное превращения α -кобальта (ГПЦ) в β -кобальт (ГЦК), нами была принята температура 300 °С.

Проведенные металлографические исследования (рис. 2, 3) подтвердили вышеприведенные аргументы.

В результате всей термической обработки (закалок, отпусков) зёрна карбидов несколько уменьшились в размерах, данная картина прослеживается на фрактографиях излома (рис. 4-6).

После проведения термической обработки в солях по 11 режимам были определены физико-механические свойства сплава (96 %; W 4% Co) (табл. 3).

Таблица 3

Свойства твердого сплава (96 %; W 4% Co)

Table 3

Properties of hard alloy (96 %; W 4% Co)

Режим Т.О.	Физические свойства					Механические свойства		
	Размер основной массы карбидных зерен, мкм	Коэрцитивная сила, Э	Удельное электро-сопротивление, мкОм см	Коэффициент линейного термического расширения 10 ⁶ град-1	Плотность, г/см ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Твердость	
							HRA	HV, Н/мм ²
Режим 1	2-3	140-180	19,3	0,12	14,9-15,1	4360	90,5	1752
исходный	2-5	60-90	18,8	0,12	14,9-15,1	4110	88,0	1160

Физические свойства твердого сплава ВК4 после термической обработки практически не изменились (увеличилась в 2 раза коэрцитивная сила), однако отмечено увеличение на 10-30 % предела прочности при сжатии и твердости.

В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5-2 раза.

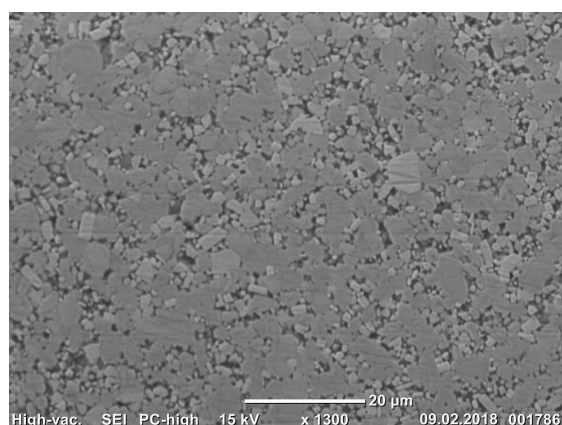


Рис. 2. Микроструктура твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 1, $\times 1300$

Fig. 2. Microstructure of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 1, $\times 1300$

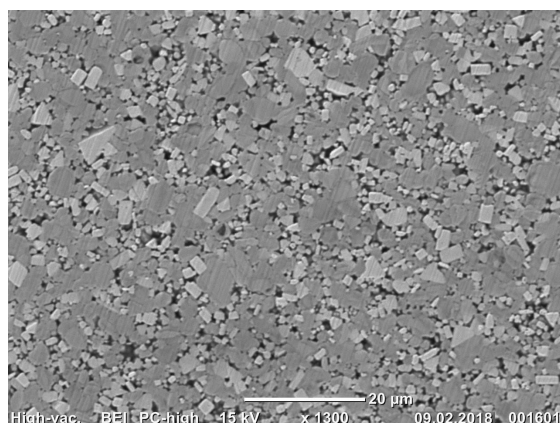


Рис. 3. Микроструктура твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 2, $\times 1300$

Fig. 3. Microstructure of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 2, $\times 1300$



Рис. 4. Фрактография излома твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 1, $\times 1000$

Fig. 4. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 1, $\times 1000$

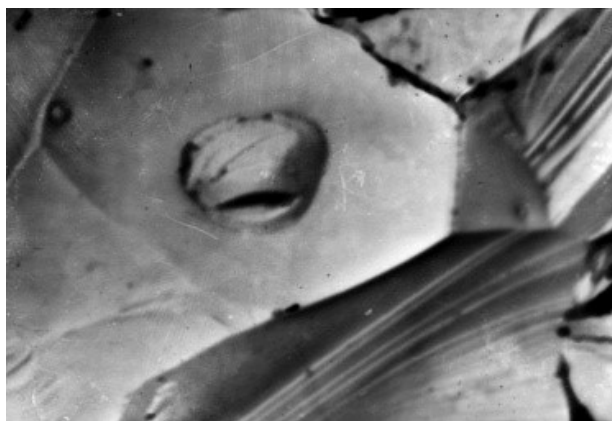


Рис. 5. Фрактография излома твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 9, $\times 1000$

Fig. 5. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 9, $\times 1000$

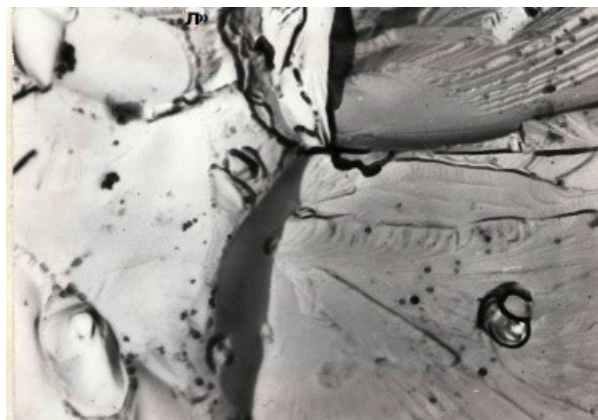


Рис. 6. Фрактография излома твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 10, $\times 1000$

Fig. 6. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 10, $\times 1000$

Полагаем, что повышенная стойкость в % отношении означает следующее: в 1,5-2,5 раза увеличивается стойкость от повышения твердости и прочности за счет диффузионного растворения ϵ , η_1 , η_2 и χ -фаз, и в 2-3,5 раза увеличивается стойкость от возникающей «кольцевой» структуры, обеспечивающей равномерность свойств и некоторое повышение твердости и прочности.

Термообработанные по 1 режиму пластины, доведенные алмазным кругом, показали стойкость примерно 200 минут, в тоже время, как стандартная стойкость при таком же режиме составляет около 40 минут, износ до 0,8 мм.

Выводы

1. Применили метод, многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки сплава ВК4.
2. В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5-2 раза.

3. В 1,5–2,5 раза увеличивается стойкость от повышения твердости и прочности за счет диффузионного растворения ϵ , η_1 , η_2 и χ -фаз, и в 2–3,5 раза увеличивается стойкость от возникающей структуры, обеспечивающей равномерность свойств и некоторое повышение твердости и прочности.

4. Объединение во времени первой и второй закалки недопустимо, так как это ведет к неконтролируемым в процессе термической обработки реакциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Zhang Li., Wang Yuan-Jie., Yu Xian-wang., Chen Shu., Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–CO cemented carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2018) 295–300.

[2] Colovcan V.T. Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *IntJ. Refract. Met. HardMater.* 26 (4) (2018) 301–305.

[3] Богодухов С.И. Высокотемпературное ионное азотирование твердосплавных неперетачиваемых пластин марки Т15К6 / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // *Металловедение и термическая обработка*. 4 (2019) 30–39.

[4] Patsera E.I., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Kovalev D.Yu. Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. *Ceram. Int.* 41(7) (2015) 8885–8893.

[5] Chebykin E.P., Stepanova O.G., Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Panov V.S. Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography*. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] Свиденко Е.В. Повышение эксплуатационных свойств титановольфрамовых твердых сплавов с использованием технологии высокоэнергетической обработки : диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.01 / Свиденко Е.В. – Оренбург, (2016) 174.

[7] Способ упрочнения твердых сплавов / Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский государственный университет".- № 2018136804 заявл. 18.10.2018 опубл. 01.07.2019, 19 (2019).

[8] Способ упрочнения ультрадисперсного твердого сплава азотированием / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский гос. ун-т".- № 2019116142 заявл. 27.05.2019 опубл. 12.11.2020, 19 (2020).

[9] Шеин Е.А. Комбинированная термическая обработка в сплаве ВК8 высокоэнергетическими источниками нагрева: диссертация... кандидата технических наук: 05.16.01 / Шеин Е.А.; [Место защиты: Оренбург. гос. ун-т]. Оренбург, 2009. 136 с.

[10] Qiu W.Q., Liu Z.W., He L.X., Zeng D.C., Mai Y.-W. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. *Mater. Lett.* 81 (2018) 155–157.

[11] Panov V.S., Zaitsev A.A. Developmental tendencies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloyed with tantalum carbide. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 56 (4) (2015) 477–485.

[12] Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A*. 483(2018) 148–152.

[13] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (2) (2018) 120–126.

[14] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (5) (2018) 414–419.

[15] **Ранов V.S.** Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 53 (11) (2018) 64–654.

[16] **Ярьсько С.И.** Физические и технологические основы упрочнения твердых сплавов. — Самара, 2006. 235 с.

[17] **Сальников М.А.** Разработка буровых твёрдых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: диссертация... кандидата технических наук: 05.02.01 / Сальников М.А.; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т]. — Самара, 2009. — 158 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗИК Елена Станиславовна — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: ele57670823@yandex.ru

БОГОДУХОВ Станислав Иванович — профессор, Оренбургский государственный университет, д-р техн. наук.
E-mail: ogu@mailgate.ru

СВИДЕНКО Екатерина Валерьевна — старший преподаватель, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

РУДНЕВ Игорь Владимирович — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: skonst@mail.osu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.05.2021

REFERENCES

[1] **Li. Zhang, Yuan-Jie. Wang, Xian- wang. Yu, Shu. Chen, Xiang-Jin. Xiong**, Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–CO cemented carbide. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 26 (4) (2018) 295–300.

[2] **V.T. Colovcan**, Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. IntJ. Refract. Met. HardMater. 26 (4) (2018) 301–305.

[3] **S.I. Bogodukhov**, Vysokotemperaturnoye ionnoye azotirovaniye tverdospлавnykh neperetachivayemykh plastin marki T15K6 / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. 4 (2019) 30–39.

[4] **E.I. Patsera, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, D.Yu. Kovalev**, Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. Ceram. Int. 41 (7) (2015) 8885–8893.

[5] **E.P. Chebykin, O.G. Stepanova, E.L. Goldberg, S.A. Gorbarenko, V.S. Panov**, Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. Paleoceanography. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Ye.V. Svidenko**, Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv titanovolframovykh tverdykh сплавов s ispolzovaniyem tekhnologii vysokoenergeticheskoy obrabotki : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.16.01 / Svidenko Ye.V. — Orenburg, (2016) 174.

- [7] Sposob uprochneniya tverdykh splavov / Bogodukhov S.I., Kozik Ye.S., Svidenko Ye.V.; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet".- № 2018136804 zayavl. 18.10.2018 opubl. 01.07.2019, 19 (2019).
- [8] Sposob uprochneniya ultradispersnogo tverdogo splava azotirovaniyem / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gos. un-t".- № 2019116142 zayavl. 27.05.2019 opubl. 12.11.2020, 19 (2020).
- [9] Ye.A. Shein, Kombinirovannaya termicheskaya obrabotka v splave VK8 vysokoenergeticheskimi istochnikami nagreva: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.16.01 / Shein Ye.A.; [Mesto zashchity: Orenburg. gos. un-t]. Orenburg, 2009. 136 s.
- [10] W.Q. Qiu, Z.W. Liu, L.X. He, D.C. Zeng, Y.-W. Mai, Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. Mater. Lett. 81 (2018) 155–157.
- [11] V.S. Panov, A.A. Zaitsev, Developmental tendencies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloyed with tantalum carbide. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 56 (4) (2015) 477–485.
- [12] Z. Zhang, D.L. Chen, Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. Mater. Sci. Eng. A. 483 (2018) 148–152.
- [13] A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov, Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. Russ. J. Non-Ferr. Met. 49 (2) (2018) 120–126.
- [14] A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov, Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. Russ. J. Non-Ferr. Met. 49(5) (2018) 414–419.
- [15] V.S. Panov, Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 53 (11) (2018) 643–654.
- [16] S.I. Yaresko, Fizicheskiye i tekhnologicheskiye osnovy uprochneniya tverdykh splavov. – Samara, 2006. 235 s.
- [17] M.A. Salnikov, Razrabotka burovykh tverdykh splavov s povyshennymi kharakteristikami plastichnosti i treshchinostoykosti na osnove vysokotemperaturnykh karbidov volframa: dissertatsiya...kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.02.01 / Salnikov M.A.; [Mesto zashchity: Sam. gos. tekhn. un-t]. – Samara, 2009. – 158 s.

THE AUTHORS

KOZIK Elena S. – *Orenburg State University.*
E-mail: ele57670823@yandex.ru

BOGODUKHOV Stanislav I. – *Orenburg State University.*
E-mail: ogu@mailgate.ru

SVIDENKO Ekaterina V. – *Orenburg State University.*
E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

RUDNEV Igor' V. – *Orenburg State University.*
E-mail: skonst@mail.osu.ru

Received: 31.05.2021