

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.78

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С НАГРЕВОМ В СРЕДЕ ВОДОРОДА НА СВОЙСТВА ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ T15K6

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. В работе исследовали влияние различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства (твёрдость и величина износа по задней поверхности) изделий из порошкового твердого сплава. Исследования проводили на пятигранных неперетачиваемых пластинах ГОСТ 19065-80 из двойного твердого сплава марки T15K6 с механическим креплением, причем параметры определяли как без снятия поверхностного слоя, так и после его снятия. При нагреве под закалку в хлорбариевых ваннах изменение массы образцов практически отсутствует. При закалке и отпуске в солевых ваннах может происходить частичное растворение твердых сплавов, в связи с чем произвели измерения потери массы образцов. Производили закалку образцов в одном охладителе и изотермическую закалку в соляных ваннах. Для закалки в одном охладителе варьировали: температура нагрева под закалку – от 950 до 1150 °С; скорость охлаждения – от 10°С/с (воздух) до 110°С/с (масло); температура отпуска – от 200 до 600°С; кратность отпуска – от 1 до 3 раз со временем одного краты 15 мин. Анализ приведенных результатов термообработанных пластин показал, что в них происходят структурные изменения, наблюдается наличие η-фазы при нагреве до температур 1300 и 1450°С. Режущие свойства пластин определяли путем резания на вертикально-фрезерном станке модели 6Н11. В качестве инструмента использовали торцовую фрезу диаметром 100 мм с механическим креплением испытываемых пластин. Экспериментально установленное изменение свойств твердых сплавов при термической обработке связано либо с изменением фазового состава сплава, состава связующей фазы, либо с более тонкими изменениями структуры карбидной фазы, отвечающей за износостойкость.

Ключевые слова: термическая обработка, микротвёрдость, теплостойкость, прочность, твердый сплав марки T15K6.

Введение

Наиболее применимыми методами повышения стойкости твердых сплавов является алмазная обработка, нанесение износостойких плёнок и покрытий.

Наряду с преимуществами, такие методы упрочнения инструмента имеют и недостатки, основные из которых их высокая себестоимость и нестабильность получаемых свойств.

Механические (эксплуатационные) свойства инструмента определяют твёрдость, микротвёрдость, прочность, теплостойкость, теплопроводность, ударная вязкость, стойкость против окисления при повышенных температурах, коррозионная стойкость, и от этих свойств зависят режущие свойства инструментов [1–10].

В связи с этим поиск новых методов и режимов нагрева твердых сплавов в защитных средах,

сокращение длительности термической обработки и уход от специального оборудования представляется весьма целесообразным, на что и направлена наша работа.

Целью работы является исследование влияния различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства твердых сплавов.

Материалы и методы исследования

В данной работе исследовали влияние различных охлаждающих сред при закалке на физико-механические и эксплуатационные свойства (твёрдость и величина износа по задней поверхности) изделий из порошкового твердого сплава. Исследования проводили на пятигранных неперетачиваемых пластинах ГОСТ 19065-80 из двойного твердого сплава марки T15K6 (рис. 1) с механическим креплением, причем параметры определяли как без снятия поверхностного слоя, так и после его снятия. Пластины, прошедшие терми-

ческую обработку, и пластины в исходном состоянии подвергались стойкостным испытаниям на токарно-винторезном станке модели 16К20 и 1А616 путем торцевого точения заготовки из стали марки ОС (близкой по структуре и свойствам к Ст45), заготовка осевая 210х1650, НЛЗ ГОСТ 4728-2010. Заготовку вытачивали из вагонной оси марки ОС, наружный \varnothing 160 мм, внутренний \varnothing 20 мм, длина 200 мм. Точение осуществлялось от центра к периферии без применения смазочной охлаждающей жидкости (СОЖ). Резец с неперетачиваемой пластиной устанавливался на линии центров станка, вылет его из резцедержателя принимался 40 мм. Геометрические параметры реза следующие: передний угол 15° , задний 12° , радиус при вершине 0,5 мм. Режимы резания: глубина резания $t = 1$; подача – $S=0,1$ мм; частота вращения шпинделя станка $n = 400$ и 355 мин^{-1} . Скорость резания при этом изменялась от 25 (22) до 200 (178) м/мин. Резание производилось методом поперечного точения твердосплавными пластинами по 5 и 10 проходов. После то-

чения на пластинах измеряли величину износа по передней и задней поверхностям.

Результаты исследования приведены в табл. 1.

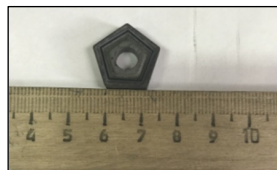


Рис. 1. Внешний вид пластины из твердого сплава Т15К6

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из табл. 1, после снятия верхнего слоя (окисленный слой), величина которого составила 0,01–0,02 мм; как правило, твердость повышается на 2–4 ед. HRA за счет дробления конгломератов карбидов, установленного методом рентгеноструктурного анализа.

Таблица 1

Значения исследованных параметров пластин Т15К6 после термической обработки (режим охлаждения: в масле при 20°C)

Температура нагрева, °C		Твердость пластин, HRA		Величина износа по задней поверхности при резании, мм					
				без заточки			после заточки		
под закалку	для отпуска	без снятия поверхностного слоя	после снятия поверхностного слоя	Испытание					
				1	2	Сред. знач.	1	2	Сред. знач.
1450	Без отпуска	88,5	90	слом	-	-	Не испытывали		
	200	82,5	93	0,89	1,25	1,07			
	400	87	93,5	0,70	слом	-			
	600	84	92	слом	-	-			
	800	87,5	92,7	0,97	слом	-			
1300	Без отпуска	90	92,7	Слом	0,63	-	Не испытывали		
	200	90	94	0,44	0,49	0,465			
	400	93	91,5	0,34	0,46	0,40			
	600	89,5	93	0,44	0,47	0,455			
	800	91,5	91,5	0,53	0,51	0,52			
1150	Без отпуска	85	89	0,25	0,20	0,225	0,13	0,15	0,14
	200	93	95	0,46	0,36	0,41	0,23	слом	-
	400	93	93	0,53	0,33	0,43	0,13	выкр	-
	600	95	95	0,42	0,40	0,41	0,12	0,15	0,135
	800	93	94	0,81	0,67	0,74	0,17	0,15	0,16
1000	Без отпуска	93,7	93,7	слом	0,7	-	Не испытывали		
	200	94,2	94	слом	-	-			
	400	92,5	93,7	0,65	0,58	0,615			
	600	93	93	0,27	0,44	0,355			
	800	94	94,5	0,76	слом	-			
800	Без отпуска	92	93	-	-	-			

Результаты макро- и микроанализа показали, что резкое охлаждение в 10% водном растворе NaCl и в воде при температуре 20°C в ряде случаев приводит к снижению механических свойств в результате образования микротрещин [11–25]. Результаты микроанализа, фрактографии и рентгеноструктурного анализа приведены на **рис. 2, 3** и в **табл. 2**.

Таблица 2

Характеристики тонкой структуры
твердого сплава T15K6

Режим термической обработки		Структурные характеристики		
Закалка	Отпуск	Фазовый состав; тип кристаллической решетки	Микронапряжения $\frac{\Delta a}{a} \times 10^{-3}$	Размер блоков $D \times 10^{-5}$ см
Температура нагрева, °C				
Исходный		WC; TiC; Co – ГПУ	0,64	0,93
1150	600	WC; TiC; Co – ГПУ	0,84	0,47
1150	400	WC; TiC; Co – ГПУ	0,80	0,37

Анализ приведенных результатов термообработанных пластин показал, что в них происходят структурные изменения, наблюдается дробление конгломератов карбидов, наличие η -фазы при нагреве до температур 1300 и 1450 °C, а при охлаждении в воде, на воздухе (спокойном и при обдуве) и при обдуве азотом наблюдается наличие дефектного слоя.

Испытаниям на износостойкость при резании подвергали пластины:

- без термообработки (исходные);
- после термообработки;
- после снятия верхнего слоя (заточки).

Режущие свойства пластин определяли путем резания на вертикально-фрезерном станке модели 6Н11. В качестве инструмента использовали торцовую фрезу диаметром 100 мм с механическим креплением испытываемых пластин.

Анализ показал повышенный износ по задней поверхности для пластин, закаленных с температур 1300 и 1450°C, причем в процессе резания часть пластин треснула и из дальнейших исследований они были исключены.

Пониженный износ пластин по задней поверхности (до 40%) при резании можно объяс-

нить образованием упрочненного слоя и за счет увеличения микронапряжений до 20% и уменьшения размера блоков до 60%. При пониженных температурах закалки от 1150 до 800°C наблюдается снижение износа по сравнению с исходным. Отпуск незначительно влияет на износ. Анализ результатов показал, что наилучшие результаты получены при температурах отпуска 400°C, наименьший износ после термообработки без снятия поверхностного слоя составил 0,18–0,21 мм, а после удаления верхнего слоя составил 0,1–0,12 мм. Износ при резании по задней поверхности для исходных пластин соответственно 0,43 и 0,21 мм (при времени испытания $t_{исп}=10$ мин).

Таким образом, приведенные результаты исследования показали возможность снижения износа неперетачиваемых пластин из твердого сплава T15K6. Для проверки и уточнения режимов были проведены дополнительные более длительные испытания. При резании с большей продолжительностью (30 мин) было установлено, что величина износа практически прямо пропорциональна длительности резания, и при 30 мин резания для исходных пластин (без снятия поверхностного слоя) износ по задней поверхности составил 1,15–1,0 мм. Все режимы резания были приняты, как и в предыдущих испытаниях. Результаты стойкостных испытаний приведены в **табл. 3**.

Таким образом, термообработка твердосплавных пластин из сплава T15K6 возможна, и при этом закалка пластин от температур 800–1150°C при различной скорости охлаждения (в масле с начальной температурой 60–80°C, воде) приводит к повышению их стойкости в 1,5–2 раза.

Из **табл. 3** видно, что пластины из твердого сплава T15K6, подвергнутые термической обработке, характеризуются стабильным уменьшением износа, что обеспечивает повышение стойкости режущего инструмента.

На основании экспериментальных исследований износа неперетачиваемых пластин T15K6 при фрезеровании определены режимы термической обработки (закалка в масле), повышающие стойкость в 1,5–2 раза.

Экспериментально установленное изменение свойств твердых сплавов при термической обработке связано либо с изменением фазового состава сплава, состава связующей фазы, либо с более

тонкими изменениями структуры карбидной фазы, отвечающей за износостойкость. Значительный объем информации о тонкой структуре твердых сплавов возможно получить, используя методы рентгеноструктурного анализа, что позволяет определять структурно чувствительные параметры, оказывающие существенное влияние на прочность сплава. Это такие параметры как величина микронапряжений, размер блоков когерентного

рассеяния, плотность дислокаций, которые могут изменяться в зависимости от режимов проведения термической обработки.

Установлено, что термическая обработка не способствует изменению фазового состава твердых сплавов. Так дифрактограмма отожженного твердого сплава Т5К10, сплава в состоянии поставки и после термической обработки не изменяются.

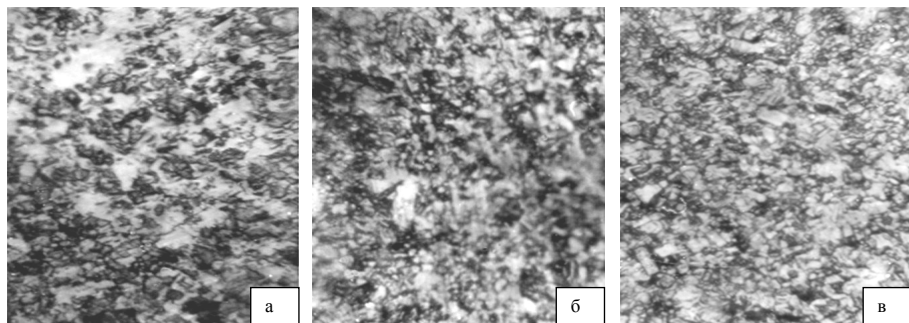


Рис. 2. Микроструктура твердого сплава Т15К6, х 1000: а – исходная; б – после закалки с выдержкой при температуре 1150°C – 20 мин в масле 60°C – 60 мин; в – после закалки с выдержкой при температуре 1150°C – 20 мин в масле 60 °C, без отпуска

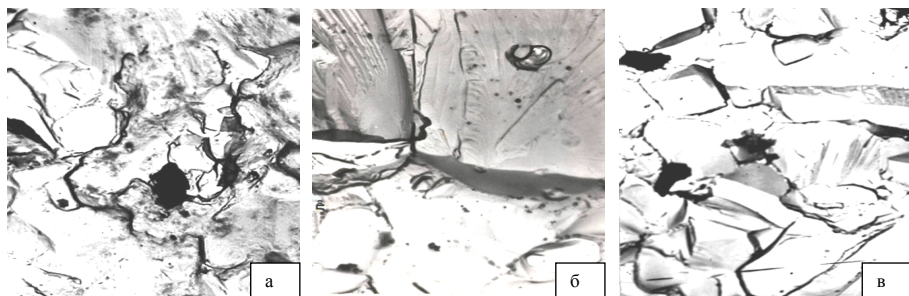


Рис. 3. Фрактографии изломов твердого сплава Т15К6, ×15500:

а – исходный, без термообработки. Излом: смешанное хрупко-вязкое разрушение; б – после закалки при температуре 1150°C с выдержкой 20 мин, закалка в масле; отпуска при температуре 400°C с выдержкой 60 мин. Излом: смешанное хрупко-вязкое разрушение; в – после закалки при температуре 1150°C с выдержкой 20 мин, закалка в масле; отпуск при температуре 600°C с выдержкой 60 мин.

Излом: хрупкое разрушение по межкристаллитным границам

Таблица 3

Результаты стойкостных испытаний пластин Т15К6 после термообработки
(режим резания $V = 385$ м/мин, $t = 1,5$ мм, $S = 125$ мм/мин, $T = 30$ мин)

Режим термообработки			Твердость, HRA		Износ по задней поверхности, мм
Температура нагрева под закалку, °C	Закалочная среда	Температура отпуска, °C	после закалки	после отпуска	
1300		400	92,5	94	0,95
1150	Вода, 40°C	Без отпуска	93,5	-	0,85
"	"	800	92,5	93,5	1,07
"	"	600	92,5	94,5	1,01
"	"	400	92	94	1,01
"	"	200	92,5	93	0,74
"	Масло, 80°C	200	92,5	93	1,08
"	Масло, 100°C	600	92	93	1,39
"	"	400	92,5	94	0,90
"	"	200	92,5	-	1,00
"	Сж. воздух	600	92,5	94,5	1,41
"	"	600	92	94	0,70
"	"	200	92	93	0,81
"	На воздухе	Без отпуска	92	-	0,70
1000	Вода, 20°C	"	"	-	1,06
"	"	600	92	92,5	0,62
"	"	400	92	93	0,87
"	"	200	92	95	0,84
"	Вода, 40°C	600	92,5	93,5	0,87
"	"	400	92,5	94	0,93
"	"	200	92	94	1,02
"	50%масла + + 50% воды	Без отпуска	91	-	1,01
"	Масло, 80°C	Без отпуска	92,5	-	1,15
"	"	400	92,5	93,5	0,86
"	"	200	92,5	-	1,00
"	На воздухе	Без отпуска	90,5	-	0,75
"	"	600	91	93	1,25
"	"	400	91	94	0,99
"	"	200	91	93	1,08
800	Вода + 10% NaCl	Без отпуска	95	-	1,13
"	На воздухе	Без отпуска	91	-	0,96
Исходные, без термообработки			89–91	90 - 91	1,3–1,5

Закключение

В результате проведенной научно-исследовательской работы по упрочнению изделий из твердых сплавов с использованием нагрева в водорододе до различных температур и охлаждением в различных закалочных средах с применением отпуска от 200 до 800°C и без отпуска установлено, что:

- твердость термообработанных изделий повышется 2–3 ед. по сравнению с исходными в состоянии поставки;

- пониженный износ пластин по задней поверхности (до 40%) при резании можно объяснить образованием упрочненного слоя и за счет

увеличения микронапряжений до 20%, уменьшения размера блоков до 60%;

- проведено исследование тонкой структуры твердых сплавов с использованием просвечивающей электронной микроскопии и методов рентгеноструктурного анализа, позволяющее установить дробление конгломератов карбидов и изменение микронапряжений карбидной фазы после проведения термической обработки с нагревом в водорододе;

- на основании экспериментальных исследований износа неперетачиваемых пластин Т15К6 при фрезеровании определены оптимальные режимы термической обработки (закалка в масле), позволяющие понизить износ до 40%.

Список литературы

1. Методы повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента / Богодухов С.И., Гарипов С.И., Калмыков Е.В., Шейнин Б.М.; ГОУ ОГУ. Оренбург, 2004. 27 с. Деп. в ВИНТИ 11.10.04 № 1583-B2004.
2. Третьяков В.И., Клячко Л.И. Твердые сплавы, тугоплавкие металлы, сверхтвердые материалы. М.: ГУП Издательство Руда и металлы, 1999. 264 с.
3. Пат. 2113532 Российская Федерация, МПК С 22 С 29/08. Твердый сплав / Гнусов С.Ф.; заявитель и патентообладатель Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. №96113793/02; заявл. 08.07.1996; опубл. 20.06.1998.
4. Пат. 2294261 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/00. Способ закалки твердого сплава / Осолкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2005118570/02; заявл. 15.06.2005; опубл. 27.02.2007.
5. Пат. 2355513 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/08. Способ закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама / Осолкова Т.Н., Щеглова А.Б.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2007133961/02; заявл. 11.09.2007; опубл. 20.05.2009.
6. Пат. 2356693 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/24, С 22 С 29/00. Способ закалки твердого сплава / Осолкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». №2007139225/02; заявл. 22.10.2007; опубл. 27.05.2009.
7. Пат. 2392342 Российская Федерация, МПК С 22 С 29/00, В 22 F 3/24. Способ закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама / Осолкова Т.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет». № 2009116915/02; заявл. 04.05.2009; опубл. 04.05.2009.
8. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров. Киев: Высшая школа, 1985. 144 с.
9. Клебанов Ю.Д., Григорьев С.Н. Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологиях обработки материалов. М.: Машиностроение, 2005. 220 с.
10. Коваленко В.С. Упрочнение деталей лучом лазера. Киев: Техника, 1981. 131 с.
11. Осолкова Т. Н., Каськова Н.К. Изменение структуры и свойств твердого сплава после закалки // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2005. №14.
12. Смольников, Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 312 с.
13. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали. М.: Металлургия, 1991. 451 с.
14. Анциферов В.Н. Термохимическая обработка порошковых сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 421 с.
15. Смирнова А.В., Кокорин Г.А. Электронная микроскопия в металлведении. М.: Металлургия, 1985. 192 с.
16. Хае Г.Л., Гах В.М., Громаков К.Г. Сборный твердосплавный инструмент. Издательство: Машиностроение, 1989. 360 с.
17. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность. Киев: Наукова думка, 1984. 148 с.
18. Чапорова И.Н., Щетилина Е.А., Сереброва О.И. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1961. № 7. С. 44–46.
19. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 350 с.
20. Кан Р.У., Хаазен П.Т. Физическое металлведение, физико-механические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. 663 с.
21. Li Zhang, Yuan-Jie Wang., Yu Xian-wang., Shu. Chen, Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-CO cemented carbide. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 26 (2008) 295–300.
22. L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Figueira. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 35 (2012) 228–234.
23. J. Hell, M. Chirtoc, C. Eisenmenger-Sittner, H. Hutter, N. Kornfeind, P. Kijamnajsuk, M. Kitzmantel, E. Neubauer, K Zellhofer. Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. Surf. Coat. Technol. 208 (2012) 24–31.
24. 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 (2012) 155–157.
25. E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, A.A. Zaytsev. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles. Materials. 3 (2010) 97–109.
26. A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupasov, P.V. Sevast'yanov. Diamond tolls in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. J. Superhard Mater. 34 (2010) 423–431.

Поступила 22.05.19

Принята в печать 25.06.19

UNDERSTANDING THE EFFECT OF HEAT TREATMENT INVOLVING HEATING IN HYDROGEN MEDIUM ON THE PROPERTIES OF T15K6 GRADE HARD ALLOY

Stanislav I. Bogodukhov – Dr.Sci. (Eng.), Professor

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ogu@mailgate.ru

Elena S. Kozik – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University. Orenburg, Russia. E-mail: ele57670823@yandex.ru

Ekaterina V. Svidenko – Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer

Department of Materials Science and Technology, Aerospace Institute, Orenburg State University. Orenburg, Russia. E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Abstract. This research examined the effect of different cooling media applied during heat treatment on the physico-mechanical properties and performance (hardness and back side wear) of parts made of hard powder alloy. The study looked at clamp-on five-sided indexable inserts per GOST 19065-80 made of T15K6 grade double hard alloy. Characterization was done with the surface layer on and after it had been removed. Heat treatment in chlorine-barium baths had almost no effect on the weight of the specimens. Quenching and tempering in nitre baths may lead to partial dissolution of hard alloys. For this reason, measurements were taken to determine the weight loss in the specimens. The specimens were subjected to single-step hardening and salt-bath isothermal quenching. The following variation ranges were applied in the case of single-step hardening: heating temperature – from 950 to 1,150°C; cooling rate – from 10°C/sec (air) to 110°C/sec (oil); tempering temperature – from 200 to 600°C; tempering cycles – from 1 to 3, the time of each cycle being 15 min. Analysis of the heat-treated inserts indicate that structural changes take place in them during heat treatment. When the inserts were heated to 1,300 and 1,450°C, the η -phase was observed in them. The cutting properties of the inserts were determined by cutting on a 6H11 vertical milling machine. A 100 mm face cutter was used, and the test inserts were clamped. The heat treatment induced changes in the properties of hard alloys established through the above experiments can be linked to either the changing phase composition of the alloy or the composition of the binding phase or some finer changes in the structure of the carbide phase responsible for wear resistance.

Keywords: Heat treatment, microhardness, heat resistance, strength, T15K6 grade hard alloy.

References

1. Bogodukhov S.I., Garipov S.I., Kalmykov E.V., Sheynin B.M. *Metody povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv verdosplavnogo rezhushchego instrumenta* [Raising the performance of hard-alloy cutting tools]. Orenburg State University. Orenburg, 2004, 27 p. (In Russ.)
2. Tretiakov V.I., Klyachko L.I. *Tverdye сплавы, тугоплавкие металлы, сверхтвёрдые материалы* [Hard alloys, refractory

- metals, ultra-hard materials]. Moscow: "Ore and Metals" Publishing House, 1999, 264 p. (In Russ.)
3. Gnyusov S.F. *Tverdyi spлав* [Hard alloy]. Patent RF, No. 2113532. Applied: 08.07.1996. Published: 20.06.1998.
4. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo сплава* [A method for quenching hard alloys]. Patent RF, No. 2294261. Applied: 15.06.2005. Published: 27.02.2007.
5. Oskolkova T.N., Shcheglova A.B. *Sposob zakalki tverdogo сплава na osnove karbida volframa* [A method for quenching hard tungsten carbide alloys]. Patent RF, No. 2355513. Applied: 11.09.2007. Published: 20.05.2009.
6. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo сплава* [A method for quenching hard alloys]. Patent RF, No. 2356693. Applied: 22.10.2007. Published: 27.05.2009.
7. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo сплава na osnove karbida volframa* [A method for quenching hard tungsten carbide alloys]. Patent RF, No. 2392342. Applied: 04.05.2009. Published: 04.05.2009.
8. Kovalenko V.S. *Obработка материалов импульсным излучением лазером* [Pulsed laser materials processing]. Kiev: Vysshaya shkola, 1985, 144 p. (In Russ.)
9. Klebanov Yu.D., Grigoriev S.N. *Fizicheskie osnovy primeneniya konsentrirovannykh potokov energii v tekhnologiyakh obrabotki materialov* [The physical basis behind the application of concentrated energy streams in materials processing]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 220 p. (In Russ.)
10. Kovalenko V.S. *Uprochnenie detaley luchom lazera* [Laser beam hardening of parts]. Kiev: Tekhnika, 1981, 131 p. (In Russ.)
11. Oskolkova T.N., Kaskova N.K. The structure and properties of hard alloy changed by quenching. *Vestnik gornometallurgicheskoy sektsii RAEN. Otdelenie metallurgii* [Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy], 2005, No. 14. (In Russ.)
12. Smolinov E.A. *Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka instrumentov v solyanykh vannakh* [Thermal and thermochemical processing of tools in salt baths]. 2nd revised edition. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 312 p. (In Russ.)
13. Bernshteyn M.L., Rakhshtadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali* [Science of metals and heat treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 451 p. (In Russ.)
14. Antsiferov V.N. *Termokhimicheskaya obrabotka poroshkovykh staley* [Thermochemical processing of powder steels]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Acade-

- my of Sciences, 1997, 421 p. (In Russ.)
15. Smirnova A.V., Kokorin G.A. *Elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* [Electron microscopy in metals science]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 192 p. (In Russ.)
 16. Khaet G.L., Gakh V.M., Gromakov K.G. *Sbornyy tverdosplavnyy instrument* [Split-design carbide tools]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 360 p. (In Russ.)
 17. Loshak M.G. *Prochnost i dolgovechnost* [Strength and durability]. Kiev: Naukova dumka, 1984, 148 p. (In Russ.)
 18. Chaporova I.N., Shchetilina E.A., Serebrova O.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metals science and heat treatment of metals]. 1961, no. 7, pp. 44–46. (In Russ.)
 19. Khrushchev M.M., Babichev M.A. *Issledovanie iznashivaniya materialov* [Understanding wear of materials]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960, 350 p. (In Russ.)
 20. Kan R.U., Khaazen P.T. *Fizicheskoe metallovedenie, fiziko-mekhanicheskie svoystva metallov i spлавov* [Physical metallurgy, physico-mechanical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 663 p. (In Russ.)
 21. Li Zhang, Yuan-Jie Wang., Yu Xian-wang., Shu. Chen, Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-CO cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 26 (2008) 295–300.
 22. L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Filgueira. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 35 (2012) 228–234.
 23. J. Hell, M. Chirtoc, C. Eisenmenger-Sittner, H. Hutter, N. Kornfeind, P. Kijamnajsuk, M. Kitzmantel, E. Neubauer, K. Zellhofer. Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. *Surface and Coatings Technology*. 208 (2012) 24–31.
 24. 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. *Materials Letters*. 81 (2012) 155–157.
 25. E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, A.A. Zaitsev. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles. *Materials*. 3 (2010) 97–109.
 26. A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupašov, P.V. Sevastyanov. Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *Journal of Superhard Materials*. 34 (2010) 423–431.

Received 22/05/19

Accepted 25/06/19

•

Образец для цитирования

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния режимов термической обработки с нагревом в среде водорода на свойства твердого сплава марки Т15К6 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 46–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

For citation

Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Understanding the Effect of Heat Treatment Involving Heating in Hydrogen Medium on the Properties of T15K6 Grade Hard Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 46–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-46-53>

•