

DOI: 10.18721/JEST.26411

УДК 671.622

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

Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия

ПОИСКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ БЕЗОКСИДТЕЛЬНОГО НАГРЕВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Наиболее применимыми способами повышения стойкости твердых сплавов является механическая обработка, нанесение износостойких плёнок и покрытий. Наряду с этим интерес представляет другое направление улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента – термическая обработка. Общие недостатки указанных способов – незначительное повышение стойкости и недостаточная стабильность получаемых результатов. В связи с этим нами была проведена серия экспериментальных работ, направленных на исследование влияния термической обработки изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (твердость и износостойкость). Применение упрочняющих технологий обработки режущего инструмента для снижения нестабильности его режущих свойств остается актуальной проблемой. Существуют различные методы упрочнения твердосплавного режущего инструмента, которые условно разделены на три группы: механическая обработка, нанесение покрытий и термическая обработка, причем термообработка проста в осуществлении и позволяет получать приемлемые результаты. Режимы термической обработки порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при термообработке за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева под закалку [1–22]. Цель данной работы состояла в определении влияния влияния термообработки (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность, на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов.

Ключевые слова: изделия из твердых сплавов, безокислительный нагрев, твердость, прочность, износ.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В. Поисковые исследования по влиянию безокислительного нагрева на эксплуатационные свойства изделий из твердых сплавов // *Материаловедение. Энергетика.* 2020. Т. 26, № 4. С. 132–142. DOI: 10.18721/JEST.26411

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. Shvidenko

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

EXPLORATORY RESEARCH ON THE EFFECT OF NON-OXIDATIVE HEATING ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF HARD ALLOY PRODUCTS

The most applicable methods for increasing the resistance of hard alloys are mechanical processing, application of wear-resistant films and coatings. Along with this, another area of interest of improving the operational properties of cutting tools is heat treatment. The common disadvantages of these methods are a slight increase in resistance and insufficient stability of the results obtained. In this regard, we conducted a series of experimental studies aimed at studying the effect of heat treatment of hard alloy products on their performance characteristics (hardness and wear resistance). The use of hardening technologies for processing cutting tools to reduce the instability of their cutting properties remains an urgent problem. There are various methods of hardening carbide cutting tools, which are divided into three groups: mechanical processing, coating and heat treatment. At the same time, heat treatment is a simple method providing acceptable results. The heat treatment conditions for powder cemented carbides differ from the treatment conditions for compact steels. Porosity intensifies many chemical processes during heat treatment due to considerable activity of the surface of the products manufactured by using powder materials, and enhances susceptibility to oxidation and decarburization during heating for hardening [1–22]. The purpose of this paper was to determine the influence of heat treatment (heating temperature changes prior to quenching and tempering) on hardness, strength, bending and wear-resistant properties of cemented carbide samples.

Keywords: cemented carbide products, non-oxidative heating, hardness, strength, wear.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, E.V. Shvidenko, Exploratory research on the effect of non-oxidative heating on the performance properties of hard alloy products, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 132–142, DOI: 10.18721/JEST.26411

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

Введение. Обработка заготовок резанием в технологии машиностроения занимает важное место, но применение новых конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами зачастую сдерживается низкой стойкостью инструмента.

Все это ставит задачу повышения эксплуатационных характеристик и работоспособности металлообрабатывающего инструмента, и в первую очередь, инструмента, изготовленного с использованием твердых сплавов.

Наиболее применимыми способами повышения стойкости твердых сплавов является механическая обработка, нанесение износостойких плёнок и покрытий. Наряду с этим интерес представляет другое направление улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента – термическая обработка. Общие недостатки указанных способов – незначительное повышение стойкости и недостаточная стабильность получаемых результатов.

В связи с этим нами была проведена серия экспериментальных работ, направленных на исследование влияния термической обработки изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (твёрдость и износостойкость).

Применение упрочняющих технологий обработки режущего инструмента для снижения нестабильности его режущих свойств остается актуальной проблемой. Существуют различные методы упрочнения твердосплавного режущего инструмента, которые условно разделены на три группы: механическая обработка, нанесение покрытий и термическая обработка, причем термообработка проста в осуществлении и позволяет получать приемлемые результаты.

Режимы термической обработки порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при термообработке за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева под закалку [1–17].

Цель данной работы состояла в определении влияния термообработки (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность, на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов.

Методы и материалы

Термическая обработка (ТО) образцов твердых сплавов включала закалку и отпуск (или без него), причем, изменяли как методы нагрева, так и закалочные среды, в качестве которых рассматривали воду и воздух, индустриальное масло, концентрированный водный раствор желтой кровяной соли и ее порошок.

Материалом для исследования послужили пятигранные пластины из твердого сплава марки ВК8, внешний вид которых представлен на рис. 1.

Химический состав и физико–механические свойства твердого сплава марки ВК8 представлены в табл. 1.

В первой серии опытов безокислительный нагрев проводили в соляной ванне. При этом рассмотрели влияние ТО (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов. Затем проводился отпуск закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С.

Во второй серии опытов для обеспечения безокислительного нагрева, который способствует повышению эксплуатационной стойкости и качества нагрева изделий из твердых сплавов на основе карбида вольфрама в процессе закалки была разработана и применена индукционно-закалочная установка [17]. Установка позволила осуществлять одновременный индукционный нагрев большого количества небольших заготовок, причем, что весьма важно для заготовок из твердых сплавов, нагрев заготовок в такой установке равномерный, так как они занимают одинаковое положение по отношению к индуктору.

На третьем этапе была рассмотрена возможность термообработки с прямым контактным нагревом на машине точечной сварки (рис. 2) при этом из-за сокращения времени нагрева (7с про-

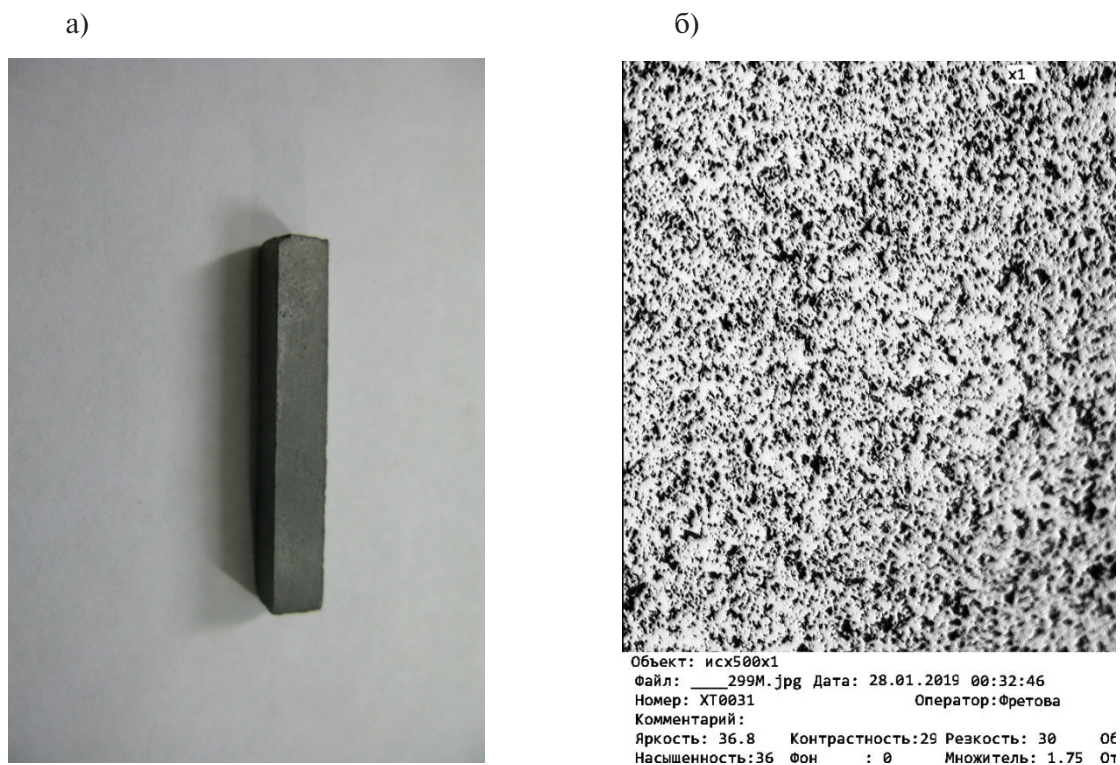


Рис. 1. Твердый сплав марки ВК8: а – штабик, б – исходная микроструктура, x500

Fig. 1. Hard alloy grade VK8: a – bar, b – initial microstructure, x500

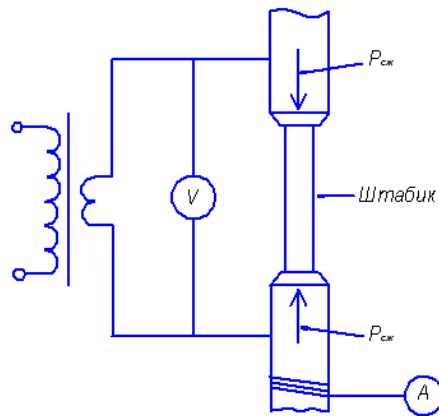


Рис. 2. Схема и вид машины контактной сварки
 Fig. 2. Contact welding machine diagram and view

Таблица 1

Состав и физико-механические свойства твердого сплава марки ВК8

Марка сплава	Химический состав, %		$\sigma_{изг}$, Н/мм ² не менее	Плотность, γ , г/см ³	Твердость, НV
	WC	Co			
ВК8	92	8	1666	14,5-14,8	1200-1300

тив 30с при индукционном нагреве) повышается качество нагрева из-за уменьшения контакта нагреваемой заготовки с воздухом.

Для усиления данного эффекта перед нагревом штабиков на машине контактной сварки их окунали в индустриальное масло, которое в процессе нагрева выгорало, тем самым защищало штабик от действия воздуха. После нагрева исследуемые образцы охлаждали в различных средах.

До и после проведения всех видов безокислительного нагрева определяли твердость по Виккерсу на твердомере HVS-10 с погрешностью ± 5 Н/мм², прочность на изгиб с погрешностью ± 1 %, износостойкость по массе (по сравнению с износом термически не обработанного образца в состоянии поставки).

Для установления влияния вида термообработки на такой параметр, как твердость необходимо определиться с базовым значением исследуемого параметра, т.к. при измерении твердости не всегда обеспечивалась воспроизводимость значений и наблюдался разброс измеряемых величин в значительном диапазоне (от 1316 до 1928 НV, Н/мм²). Для этого измерили твердость по Виккерсу трех исходных штабиков из твердого сплава марки ВК8, по 3 укола слева, по середине и справа каждой грани.

Результаты

После проведения первой серии опытов безокислительного нагрева в соляной ванне была определена твердость штабиков. Результаты измерения твердости, представлены на рис. 3.

Штабики из твердосплавных материалов после различных режимов термообработки нагружали на испытательной машине до разрушения. Данные по испытаниям на изгиб приведены в табл. 2.

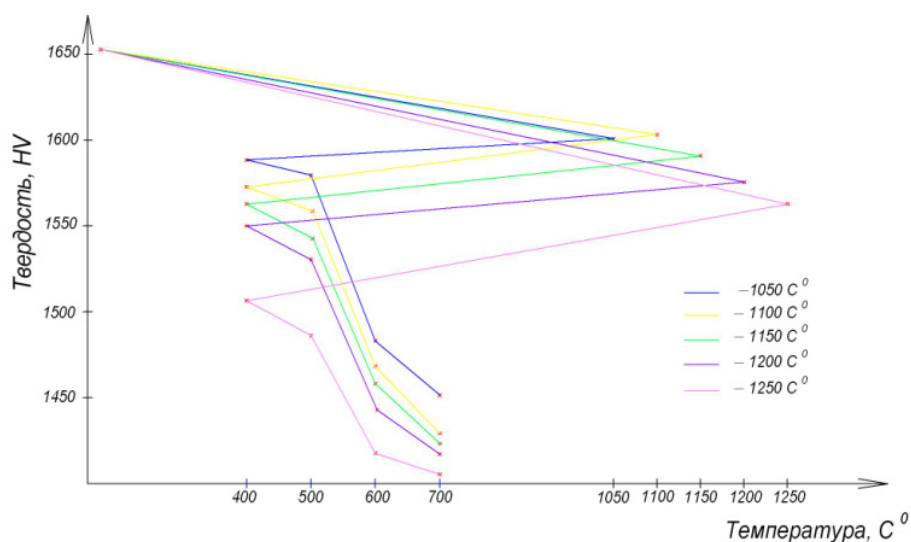


Рис. 3. Зависимость твердости сплава BK8 от температуры ТО
 Fig. 3. Dependence of alloy hardness BK8 on maintenance temperature

Таблица 2

Результаты испытания на прочность при изгибе термообработанных образцов твердых сплавов марки BK8

Table 2

Results of bending strength test of heat-treated samples of hard alloys of grade BK8

Температура нагрева под закалку, °С	Прочность исходных образцов без закалки и отпуска	Прочность, Н/мм ² закаленных образцов после отпуска при температуре, °С				
		без отпуска	400	500	600	700
1050	1670	2915	2922	2807	2637	2479
1100		2794	2859	2770	2591	2455
1150		2458	2571	2414	2059	2140
1200		2477	2584	2471	2331	2072
1250		2450	2334	2318	1961	1929

На основании результатов, полученных при истирании, были построены графики зависимости величины истирания от ее продолжительности, которые представляют практически линейные зависимости, с незначительными вариациями по наклону линий (рис. 4).

Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась (табл. 3).

Проведена термообработка штабиков с нагревом на машине точечной контактной сварки и затем измерили их твердость (рис. 5).

По интенсивности износа были построены графики по изменению интенсивности истирания образцов твердых сплавов (исходных и после ТО на машине точечной контактной сварки) в зависимости от продолжительности истирания (рис. 6 и 7).

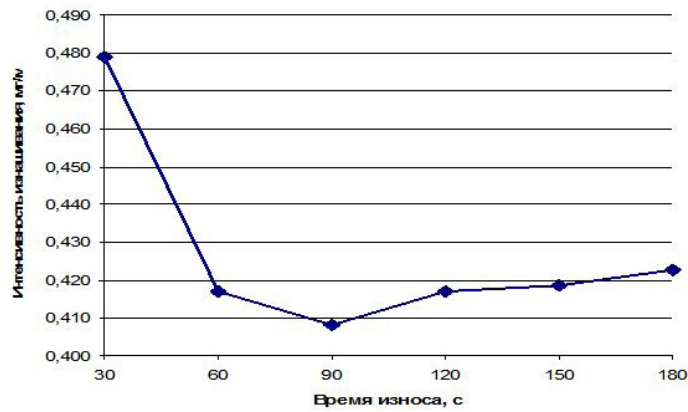


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания от продолжительности
 Fig. 4. Wear intensity versus duration

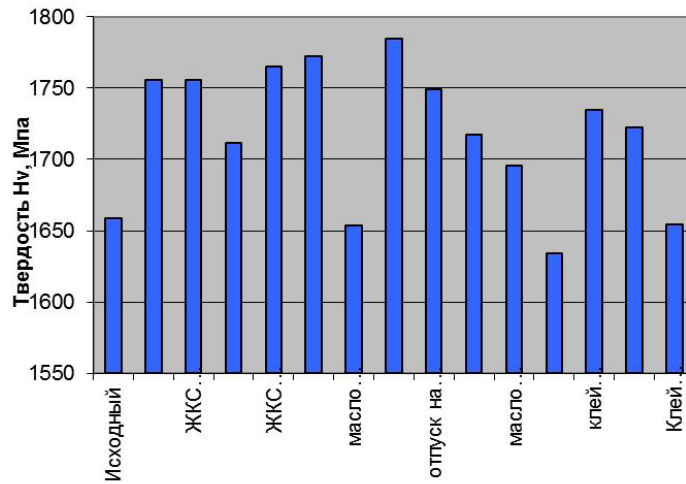
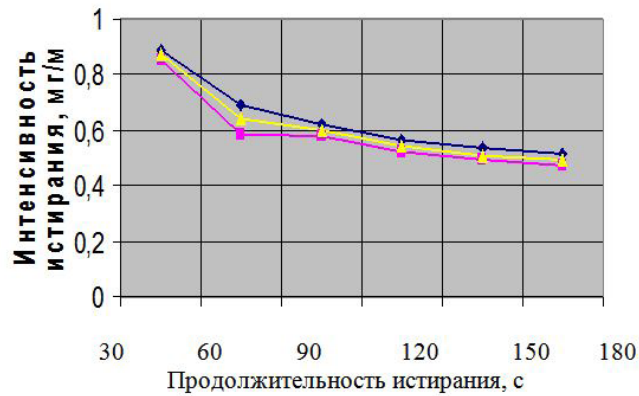


Рис. 5. Гистограмма твердостей исходного и ТО штабиков ВК8
 Fig. 5. Histogram of hardness of initial and maintenance of stacks VK8

Таблица 3
 Значение твердости штабиков (исходного и после закалки с нагревом в индукторе)

Table 3
 Value of stacks hardness (initial and after hardening with heating in inductor)

	Диагональ, мм		Твердость, НV	
	1 сторона	2 сторона	1 сторона	2 сторона
Исходный образец				
ср. знач.	0,108	0,1083	1654	1644
общ. ср	0,1081		1650	
После закалки в масле				
ср. знач.	0,1057	0,1030	1727	1817
общ. ср	0,1043		1772	

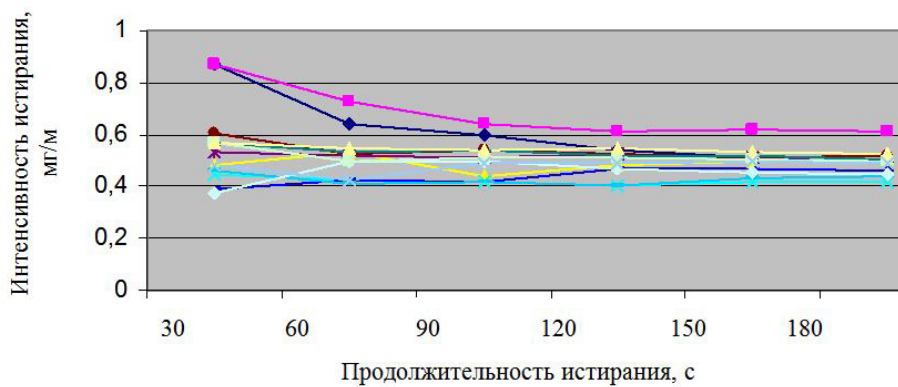


1 образец 2 образец ср. значение

Рис. 6. Зависимость интенсивности истирания исходных образцов от продолжительности истирания

1 sample 2 sample cf. value

Fig. 6. Dependence of abrasion intensity of initial samples duration of abrasion



1 2 3 4 5
6 7 8 9 10
11 12 13

1 – исходный, 2 – закалка в воде; 3 – графит+масло+закалка в масло;
4 – отпуск на воздухе; 5 – масло+ на воздухе; 6 – графит+масло+ на воздухе;
7 – ЖКС+ закалка (раствор); 8 – ЖКС+ закалка (порошок); 9 – ЖКС+ отпуск (раствор);
10 – ЖКС+ отпуск (порошок); 11 – ПВА+закалка ПВА; 12 – ПВА+ на воздухе; 13 – масло+ закалка в масло

Рис. 7. Зависимость интенсивности истирания образцов от вида ТО и продолжительности истирания

1 – initial, 2 – quenching in water; 3 – graphite + oil + quenching into oil; 4 – air release; 5 – oil + in air;
6 – graphite + oil + in the air; 7 – LCD + quenching (solution); 8 – LCD + quenching (powder);
9 – LCD + tempering (solution); 10 – LCD + tempering (powder);
11 – PVA + hardening of PVA; 12 – PVA + in the air; 13 – oil + quenching in oil

Fig. 7. Dependence of abrasion intensity of samples from type of maintenance and duration of abrasion

Обсуждение

Как видно из графика на рис. 3, проведение закалки приводит к снижению твердости при всех температурах нагрева под закалку, причем, с повышением температуры нагрева происходит

снижение твердости и при температуре нагрева от 1050 до 1100 °С оно составляет ≈ 50 HV, а при 1250 °С уже ≈ 100 HV.

Проведение отпуска закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С, также приводит к снижению твердости, причем, при проведении отпуска при температурах 400 °С и 500 °С, как и 600 °С и 700 °С отличие в снижение твердости незначительное (20 – 40 HV), а при температурах отпуска 500 °С и 600 °С снижение твердости существенное (примерно 100 HV).

Проведенные данные испытания показали, что термообработка штабиков из твердых сплавов марки ВК8 положительно сказывается на их прочности. После закалки (без отпуска) прочность штабиков повышается от 75 % при температуре закалки 1050 °С до 45 % при температуре закалки 1250 °С. С повышением температуры отпуска от 400 °С до 700 °С с интервалом 100 °С прочность штабиков несколько уменьшается и при температуре отпуска 700 °С прочность штабиков практически такая же, как и при закалке с температуры закалки 1250 °С – 2479 МПа, т.е. повышение прочности составило 47 % по сравнению с образцами состояния поставки, хотя при температуре отпуска 400 °С прочность на 75 % выше прочности состояния поставки (2922 МПа против 1670 МПа) практически такая же как и после закалки без отпуска (2922 МПа против 2915 МПа).

Относительно повышенную интенсивность изнашивания в начальный период можно объяснить притиркой торцевой поверхности штабика. Кроме традиционного безокислительного нагрева в соляных ваннах нами были предприняты попытки создания новых вариантов безокислительного нагрева, а именно, безокислительный нагрев в индукторе и прямым контактным нагревом на машине точечной сварки.

Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась на 10 – 30 % по сравнению с образцами в состоянии поставки (1772 против 1650 Н/мм²) (табл. 3), что косвенно указывает на повышение качества нагрева (обеспечение безокислительного нагрева).

Создание безокислительной атмосферы при скоростном индукционном нагреве позволило повысить твердость HV на 120 Н/мм².

Безокислительная атмосфера на машине точечной сварки позволило повысить твердость HV на 250 Н/мм².

Из приведенных данных следует, что практически все виды термообработки (кроме закалки в воде) после нагрева на машине точечной контактной сварки приводят к снижению интенсивности истирания, по сравнению с исходными образцами твердых сплавов (в состоянии поставки), причем, наилучший результат по повышению износостойкости обеспечила обработка с желтой кровяной солью.

При такой обработке износ уменьшился практически в два раза (0,4 после ТО против 0,87 мг/м для исходного образца), причем наибольший эффект по повышению износостойкости в результате термообработки наблюдается в начальный момент истирания (в первые 1,5 минуты).

Выводы

1. Проведение закалки приводит к снижению твердости при всех температурах нагрева под закалку, причем, с повышением температуры нагрева происходит снижение твердости и при температуре нагрева от 1050 до 1100 °С оно составляет ≈ 50 HV, а при 1250 °С уже ≈ 100 HV.

2. Проведение отпуска закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С, также приводит к снижению твердости, причем, при проведении отпуска при температурах 400 °С и 500 °С, как и 600 °С и 700 °С отличие в снижении твердости незначительное (20 – 40 HV), а при температурах отпуска 500 °С и 600 °С снижении твердости существенное (примерно 100 HV).

3. Проведенные данные испытания показали, что термообработка штабиков из твердых сплавов марки ВК8 положительно сказывается на их прочности. После закалки (без отпуска) прочность штабиков повышается от 75 % при температуре закалки 1050 °С до 45 % при температуре

закалки 1250 °С. С повышением температуры отпуска от 400 °С до 700 °С с интервалом 100 °С прочность штабиков несколько уменьшается и при температуре отпуска 700 °С прочность штабиков практически такая же, как и при закалке с температуры закалки 1250 °С – 2479 МПа, т.е. повышение прочности составило 47 % по сравнению с образцами состояния поставки.

4. Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась на 10 – 30 % по сравнению с образцами в состоянии поставки (1772 против 1650 Н/мм²), что косвенно указывает на повышение качества нагрева (обеспечение безокислительного нагрева).

5. Практически все виды термообработки (кроме закалки в воде) после нагрева на машине точечной контактной сварки приводят к снижению интенсивности истирания, по сравнению с исходными образцами твердых сплавов (в состоянии поставки).

6. При такой термообработке износ уменьшился практически в два раза, причем наибольший эффект по повышению износостойкости в результате термообработки наблюдается в начальный момент истирания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[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) (2008) 295–300.

[2] **Colovcan V.T.** Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2008) 301–305.

[3] **Zhixing Guo, Ji Xiong, Mei Yang, Cijin Jiang.** WC–TiC–Ni cemented carbide with enhanced properties. *J. Alloys and Compnd.* 465 (1-2) (2008) 157–162.

[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) (2016) 8885–8893.

[5] **Chebykin E.P., Stepanova O.G., Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Panov V.S.** Geochemical multi-element 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.* 2016. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Lakhotkin Yu.V.** Chemical deposition of nanostructured tungsten and tungsten-alloy coatings from gas phase. *Prot. Met. Phys. Chem.* 44 (2018) 319–332.

[7] **Berov Z.Zh., Karamurzov B.S., Tlibekov A.Kh., Yakhutlov M.M.** Selection of a coating material for diamond grits and optimization of its thickness. *J. Superhard Mater.* 5 (2008) 55–61.

[8] **De Oliveira L.J., Cabral S.C., Filgueira M.** Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 35 (2012) 228–234.

[9] **Hell J., Chirtoc M., Eisenmenger-Sittner C., Hutter H., Kornfeind N., Kijamnajsuk P., Kitzmantel M., Neubauer E., Zellhofer K.** Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. *Surf. Coat. Technol.* 208 (2012) 24–31.

[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 (2012) 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] **Panov V.S.** Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 53 (11) (2015) 643–654.

[16] **Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Andreev V.A., Rupasov S.I., Sevast'yanov P.V.** Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *J. Superhard Mater.* 34 (6) (2018) 423–431.

[17] **Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Rupasov S.I., Andreev V.A., Sevast'yanov P.V.** Designing and application of a dispersion-reinforced binder based on Cu–Ni–Fe–Sn alloy for cutting tools made of ultrahard materials. *J. Superhard Mater.* 34 (4) (2019) 270–280.

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

Дата поступления статьи в редакцию: 24.09.2020

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) (2008) 295–300.

[2] **V.T. Colovcan,** Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *Int J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2008) 301–305.

[3] **Zhixing Guo, Ji Xiong, Mei Yang, Cijin. Jiang,** WC–TiC–Ni cemented carbide with enhanced properties. *J. Alloys and Compnd.* 465 (1-2) (2008) 157–162.

[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) (2016) 8885–8893.

[5] **E.P. Chebykin, O.G. Stepanova, E.L. Goldberg, S.A. Gorbarenko, V.S. Panov,** Geochemical multi-element signatures of glacial and interglacialfacies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography.* 2016. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Yu.V. Lakhotkin,** Chemical deposition of nanostructured tungsten and tungsten-alloy coatings from gas phase. *Prot. Met. Phys. Chem.* 44 (2018) 319–332.

- [7] **Z.Zh. Berov, B.S. Karamurzov, A.Kh. Tlibekov, M.M. Yakhutlov**, Selection of a coating material for diamond grits and optimization of its thickness. *J. Superhard Mater.* 5 (2008) 55–61.
- [8] **L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Filgueira**, Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 35 (2012) 228–234.
- [9] **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.
- [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 (2012) 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. *12. 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) (2015) 643–654.
- [16] **A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupasov, P.V. Sevast'yanov**, Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *J. Superhard Mater.* 34 (6) (2018) 423–431.
- [17] **A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, Rupasov S.I., V.A. Andreev, P.V. Sevast'yanov**, Designing and application of a dispersion-reinforced binder based on Su–Ni–Fe–Sn alloy for cutting tools made of ultrahard materials. *J. Superhard Mater.* 34 (4) (2019) 270–280.

THE AUTHORS

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

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

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

Received: 24.09.2020