

DOI: 10.18721/JEST.27204
УДК 621.671

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

Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8

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 высокотемпературного ионного азотирования изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (прочность и стойкость). 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 ионного азотирования порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при высокотемпературном ионном азотировании за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева. Цель данной работы состояла в определении влияния температуры ионного азотирования (изменение температур) на прочность, на изгиб и стойкость образцов твердых сплавов.

Ключевые слова: твердые сплавы марки ВК8, высокотемпературное ионное азотирование, твердость, прочность, структура.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Гарипов В.С., Свиденко Е.В. Влияние режимов высокотемпературного ионного азотирования на свойства твердого сплава ВК8 // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 50–61. DOI: 10.18721/JEST.27204

Это 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,
V.S. Garipov, E.V. Svidenko*

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ION NITRIDING REGIMES ON THE PROPERTIES OF THE VK8 HARD ALLOY

The most applicable methods for increasing the resistance of hard alloys are mechanical treatment, application of wear-resistant films and coatings. Along with this, heat treatment is another promising direction of improving the operational properties of cutting tools. The general disadvantages of these methods are a slight increase in durability and insufficient stability of the results obtained. In this regard, we carried out a series of experimental tests 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 its cutting properties remains an urgent problem. There are various methods of hardening carbide cutting tools, which are conventionally divided into three groups: machining, coating and heat treatment, while heat treatment is easy to implement and allows obtaining acceptable results. The modes of heat treatment of powdered hard alloys differ significantly from the modes of processing compact steels. The presence of porosity intensifies many chemical processes during heat treatment due to the significant surface activity of products made of powder materials and increases the sensitivity to oxidation and decarburization during heating for quenching. The purpose of this work was to determine the influence of the effect of heat treatment (change in heating temperatures before quenching and tempering) on the hardness, strength, bending and wear resistance of hard alloy samples.

Keywords: hard alloys of the VK8 brand, high-temperature ion nitriding, hardness, strength, structure.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, V.S. Garipov, E.V. Svidenko, Influence of high-temperature ion nitriding regimes on the properties of the VK8 hard alloy, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (02) (2021) 50–61, DOI: 10.18721/JEST.27204

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

Введение. Твердые сплавы широко и эффективно применяются в металлообработке. Определено, что твердосплавным инструментом снимается около 70% всей стружки при металлорежущей обработке. Однако при интенсивном изменении в металлообработке (появление новых труднообрабатываемых материалов, применение станочных комплексов многоцелевых станков с ЧПУ) повышает требования к работоспособности и надежности твердосплавного инструмента [1, 2]. Поэтому необходимо не только создавать новые твердые сплавы с заданными свойствами, но и улучшать качество наиболее распространенных твердых сплавов. Из анализа большого количества наиболее применяемых методов повышения стойкости твердосплавного инструмента можно выделить как поверхностную термообработку, так и различные диффузионные и другие химико-термические способы обработки, нанесение покрытий, наплавка и другие способы [3–5]. В машиностроении все больше находят применение инструментальные материалы с тонкими покрытиями. Материал для покрытий: карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды, силициды тугоплавких металлов [7–10]. В раннее проведенных работах были изучены процессы нанесения покрытий на двухкарбидные твердые сплавы при низких температурах [6]. Однако весь перечень применяемых методов не дает ответа на вопросы желаемого упрочнения и повышения износостойкости однокарбидных твердых сплавов.

Целью работы является изучение влияния температурных режимов ионного азотирования на эксплуатационные характеристики однокарбидных твердых сплавов.

Методология проведения работы заключается в выявлении закономерностей влияния температурных интервалов ионного азотирования на толщину, химический состав, микроструктуру поверхностного слоя однокарбидного твердого сплава и эксплуатационные свойства.

Материалы и методы

Объектом данного исследования являлись изделия из твердых сплавов марки VK8 (неперетачиваемые пластины с отверстием и без него и штабики размером 5×5×35 мм).



Рис. 1. Штабик из твердого сплава ВК8 в исходном состоянии
 Fig. 1. Stab made of VK8 hard alloy in its original state

Высокотемпературное ионное азотирование твердых сплавов марки ВК8 проводили в вакуумной печи НГВ6/6-1 при температуре от 800 °С до 1000 °С (вакуум 6,665 Па), в среде диссоциированного аммиака, длительность выдержки при заданной температуре от 1 до 2 часов. Сущность процесса заключается в том, что в герметичном контейнере создается разряженная инертная атмосфера [16]. Штабик от 15 до 30 мин, разогревается от 800 °С до 1000 °С за счет высоких скоростей ионов азота в зоне высокой напряженности, соударяясь с деталью (катодом), внедряются в ее поверхность. Катод (штабик) – это отрицательный полюс источника помещали в контейнер, установленный в печи и присоединённый к положительному полюсу источника постоянного напряжения (анод). В качестве исходных материалов при проведении исследований использовали твердые сплавы группы ВК (ВК8) в виде неперетачиваемых пластин с отверстием и без него и штабиков размером 5×5×35 мм (рис. 1), состав и основные физико-механические свойства сплавов на основе WC-Co (по ГОСТ 3882-74) приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Химический состав, предел прочности при изгибе, плотность и твердость сплава на основе WC-Co
 Table 1
 Chemical composition, flexural strength, density and hardness of WC-Co based alloy

Марка сплава	Химический состав, %		Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, Н/мм ² не менее	Плотность, γ , г/см ³	Твердость, HV ₃₀ , Н/мм ²
	WC	Co			
ВК8	92	8	1617 ± 44,1	14,6	1500,0

Структуру исходных материалов и после ионного азотирования насыщения изучали на микровизоре μ Viso-MET и на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-6000 при увеличении 1000-3000 крат.

Микроструктура твердого сплава ВК8 представлена на рис. 2 и состоит из двух фаз: угловатых светлых зерен фазы WC, окаймленных темной фазой (твердого раствора карбида WC в кобальте).

Нагружение образцов на изгиб проводили с помощью приспособления, изготовленного с учетом ГОСТ 9391-80 и машины универсальной разрывной ИР 5047-50-10, имеющей тензометрический силоизмеритель позволяющий определять действующую нагрузку с погрешностью ±1 Н.

Схемы нагружения применяли стандартные по ГОСТ 10632-2014. Результаты фиксировались многоканальной тензометрической станцией ММТС-64.01. Предел погрешности измерений этой системы не превышает 0,1 %.

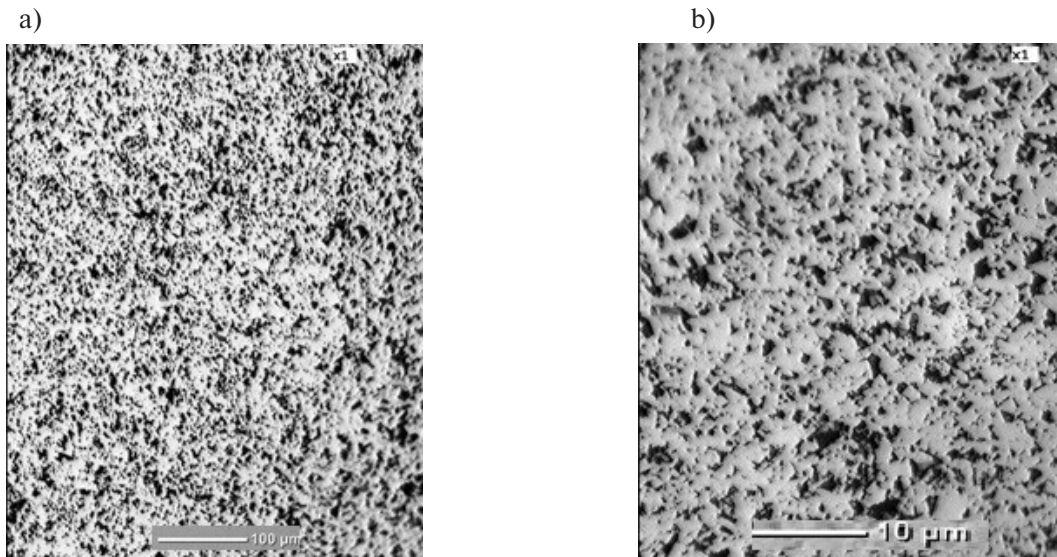


Рис. 2. Микроструктура сплава на основе WC-Co, а × 500, б × 1000
 Fig. 2. Microstructure of WC-Co based alloy, а × 500, б × 1000

Анализ химического состава проводили на растровом электронном микроскопе JeolJSM- 6000. После заточки проводили испытание пластин после высокотемпературного ионного азотирования на стойкость. Испытания резанием проводили на токарно-винторезном станке 16K20 торцевым точением. Частота вращения шпинделя, n , составляла 800 об/мин, подача, s , 0,39 мм/об. Проведен рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4-07.

Результаты

Для измерения относительной продольной деформации использовались проволочные тензодатчики на плёночной или бумажной основе с базой 5 или 10 мм.

Выбор приклеиваемых тензодатчиков в качестве основного вида преобразователей относительной деформации в электрический сигнал обуславливается рядом их положительных свойств: высокой точностью преобразования деформации в изменение сопротивления; практически неограниченным частотным диапазоном; малыми габаритными размерами и весом, не оказывающими влияния на объект исследования, дистанционность измерения [11].

Прогиб определяется по формуле

$$y_D = \frac{F \cdot l^3}{48E \cdot J_x} \quad (1)$$

Если взять значение прогиба [11, 12] на заданном интервале нагрузки на прямой, то можно из формулы (1) получить значение модуля упругости без применения средств тензометрии, например, подсчитано для ВК8 (2 режим)

$$0,000035 = \frac{500 \cdot 0,035^3 \cdot 12}{48E \cdot 0,004^4},$$

где $J_x = \frac{bh^3}{12}$, м⁴;

l – пролет, 0,03 м;

F – выбранный интервал нагрузки, 500 Н;

y_D – прогиб при выбранном интервале (изменении) нагрузки, взятый из графика, мм.

Проводим прямую по методу наименьших квадратов для каждой кривой. Выбираем интервал изменения нагрузки на 500 Н, в диапазоне, где кривая наиболее близка к прямой, в начальном ее этапе (то есть там, где нагрузка наиболее близка к минимальной) и по графику определяем прогиб. В качестве примера определение прогиба на рисунке приведено для 1 кривой. Эти данные подставляем в формулу 1 и получаем из нее значение модуля упругости.

При анализе данного рис. 3 видно, что ионное азотирование при высоких температурах снижает модуль упругости на 23,4 % материала ВК8.

Так как в области упругой деформации модуль упругости зависит от напряжения, то его снижение на 23,4 % показывает на положительную динамику влияния высокотемпературного ионного азотирования на снижение напряженного состояния твердого сплава ВК8.

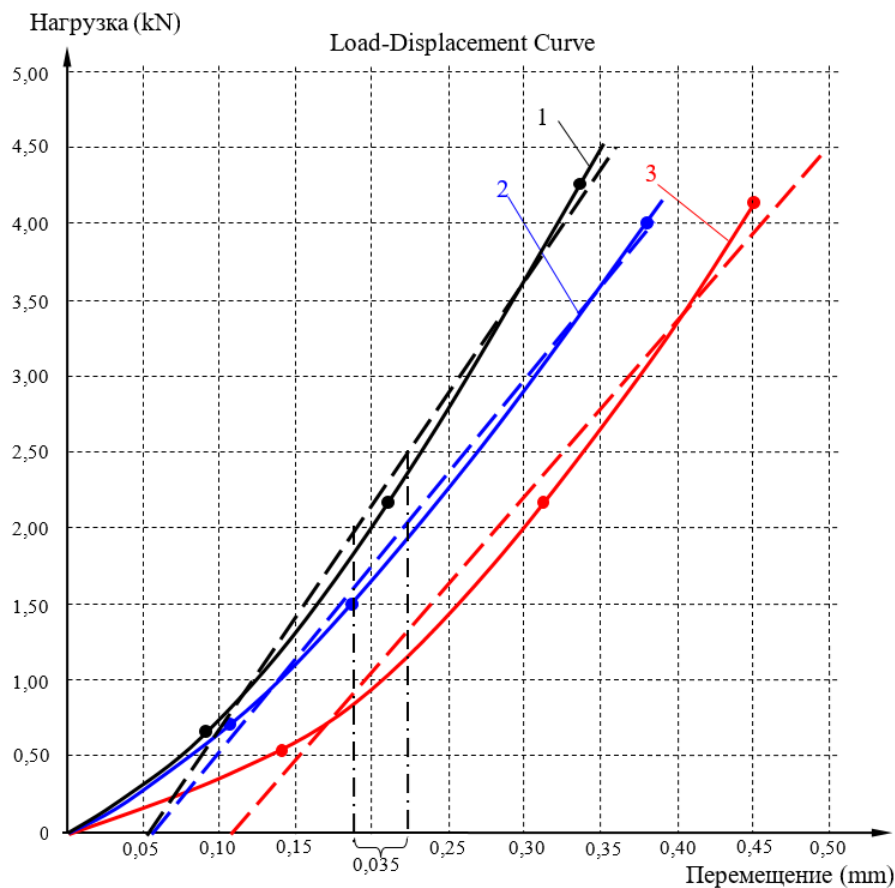


Рис. 3. Зависимость поперечной нагрузки от перемещения для сплава на основе WC-Co после различных температур ионного азотирования

Пунктирной линией показана прямая после обработки результатов эксперимента по способу наименьших квадратов.

1 – твердый сплав ВК8 (1), исходный, $E = 598$ ГПа. 2 – твердый сплав ВК8 (2), ионное азотирование при $T_{\text{нагр}} = 1000$ °С, в течении 2 ч, $E = 465$ ГПа; 3 – твердый сплав ВК8 (3), ионное азотирование при $T_{\text{нагр}} = 900$ °С, в течении 2 ч, $E = 458$ ГПа

Fig. 3. Dependence of lateral load on displacement for WC-Co based alloy after different temperatures of ion nitriding

The dotted line shows the straight line after processing the results of the experiment using the least squares method.

1 – hard alloy VK8 (1), initial, $E = 598$ GPa. 2 – hard alloy VK8 (2), ion nitriding at $T_{\text{naqr}} = 1000$ S, for 2 h, $E = 465$ GPa; 3-hard alloy VK8 (3), ion nitriding at $T_{\text{naqr}} = 900$ S, for 2 h, $E = 458$ GPa

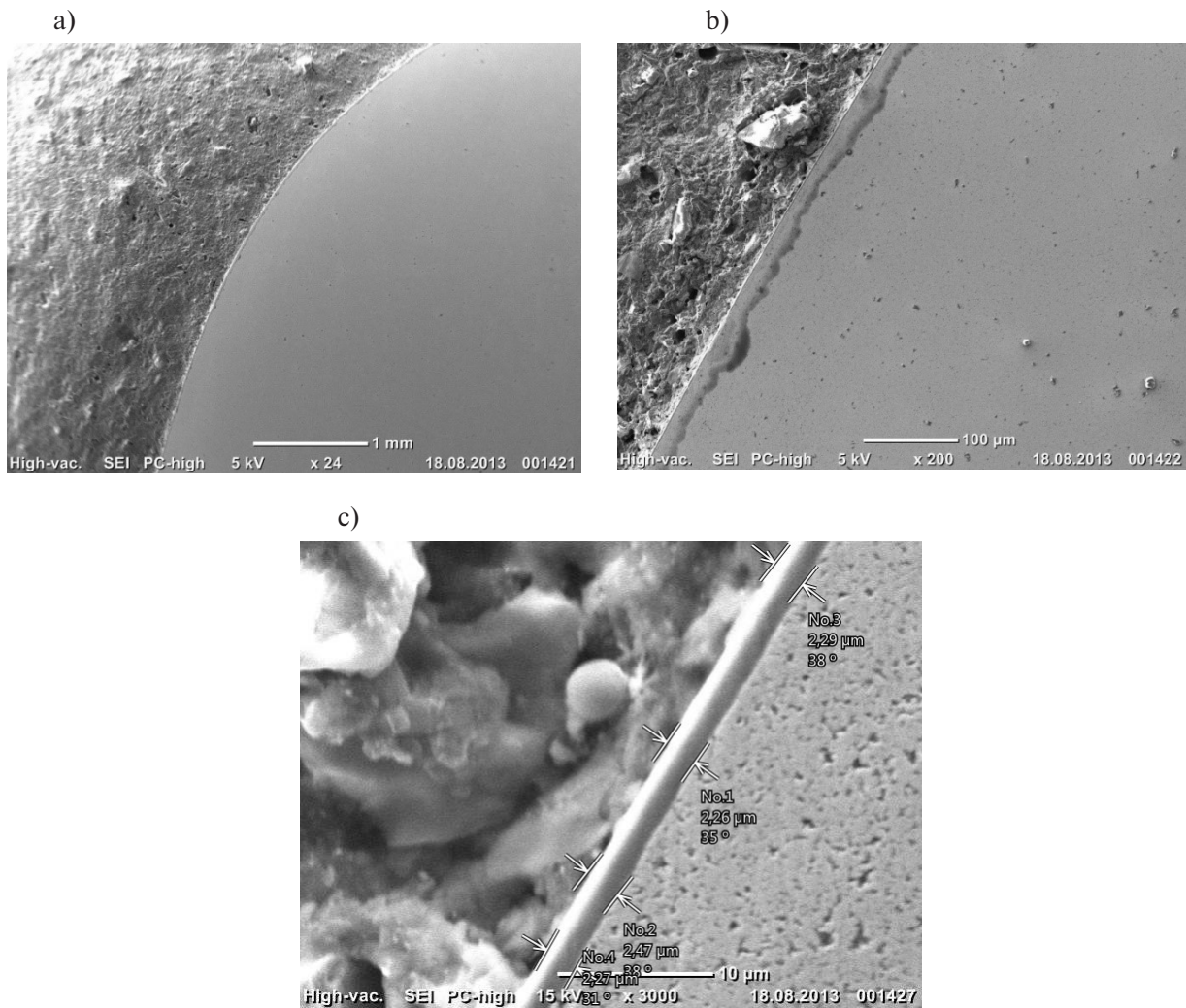


Рис. 4. Микроструктура для сплава на основе WC-Co после ионного азотирования, а – при температуре 900 °С; б – 1000 °С; в – толщина слоя после ионного азотирования при температуре 900 °С

Fig. 4. Microstructure for an alloy based on WC-Co after ionic nitriding, а – at a temperature of 900 °С; б – 1000 °С; в – layer thickness after ion nitriding at a temperature of 900 °С

Микроструктура твердого сплава ВК8 и толщина поверхностного слоя, после высокотемпературного ионного азотирования показана на рис. 4. Толщина слоя составляет от 2,23 до 2,5 мкм и мало зависит от повышения температуры с 900 °С до 1000 °С.

На рис. 5 представлен результат анализа химического состава в 5 точках от поверхности по глубине, в твердом сплаве ВК8 после ионного азотирования (ХТО) при температуре 900 °С. Прослеживается уменьшение содержания азота вглубь образца.

Результаты испытаний показаны на рис. 6. Анализ результатов стойкостных испытаний показывает, что ионное азотирование по указанным выше режимам приводит к изменению эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента с покрытиями. Наибольшую стойкость, то есть наименьший износ, показывают инструменты после ионного азотирования по режиму: ионное азотирование при 1000 °С (№ 5). Твердость пластины после данной обработки составила 1650HV₃₀. Стойкость инструмента с пластинами, после ионного азотирования по другим режимам, несколько ниже.

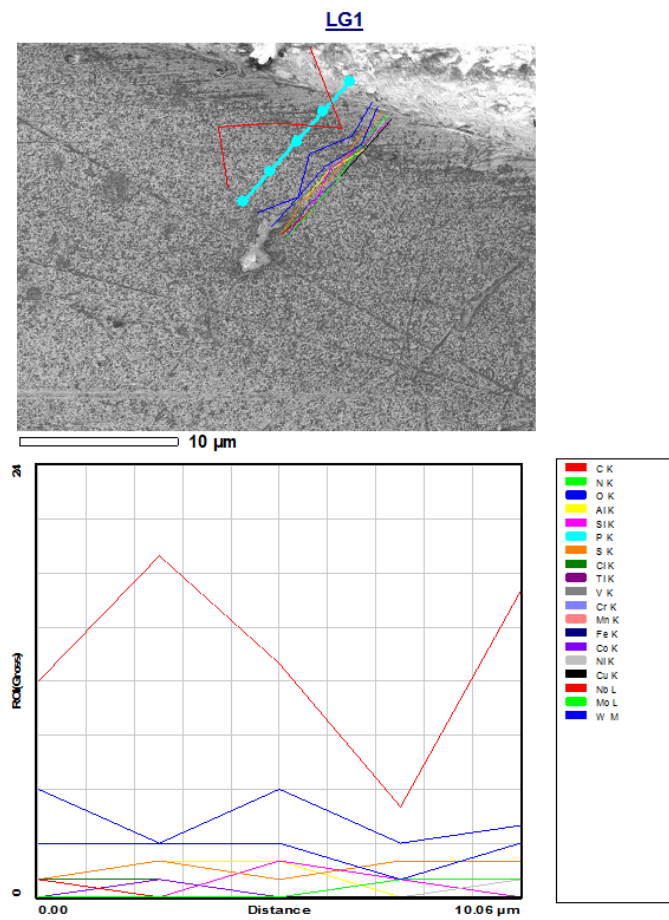
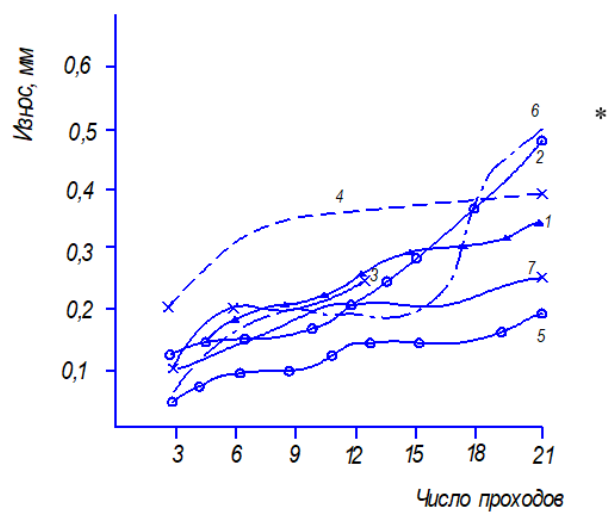


Рис. 5. Ориентировочный химический состав сплавов на основе WC-Co после ХТО при температуре 900 °С
 Fig. 5. Approximate chemical composition of WC-Co based alloys after HTT at 900 °C



* – цифры на кривых соответствуют режимам обработки (1-3 – ионное азотирование при температуре 900 °С; 4 – исходный образец; 5-7 – ионное азотирование при 1000 °С).

Рис. 6. Стойкостные испытания твердосплавных пластин ВК8
 Fig. 6. Resistance tests of hard-alloy plates VK8

Обсуждение

Стойкость после ионного азотирования инструмента связана с изменением структуры твердого сплава. Фазовый состав, размер параметров решетки, размер блоков, напряжения I рода определяли после высокотемпературного ионного азотирования. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что фазовый состав твердого сплава остается неизменным [13–16]. Период элементарной ячейки Co в сплаве ВК8, рассчитанный по линии (222) равен 0,3462 нм. Однако установлено, что технологические режимы влияют на фактор интенсивности ряда линий. Отношение интегральных интенсивностей с индексами $\left(\frac{001}{101}\right), \left(\frac{002}{120}\right)$ [12] для рассчитанных отношений составляет:

– ионное азотирование при температуре 900 °С

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,137; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,356$$

– ионное азотирование при температуре 1000 °С

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,158; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,490$$

– стандартная пластинка (без ионного азотирования)

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,214; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,524$$

По данным вычисления рентгенограммы для WC и Co были построены графики зависимости параметров структуры (рис. 7).

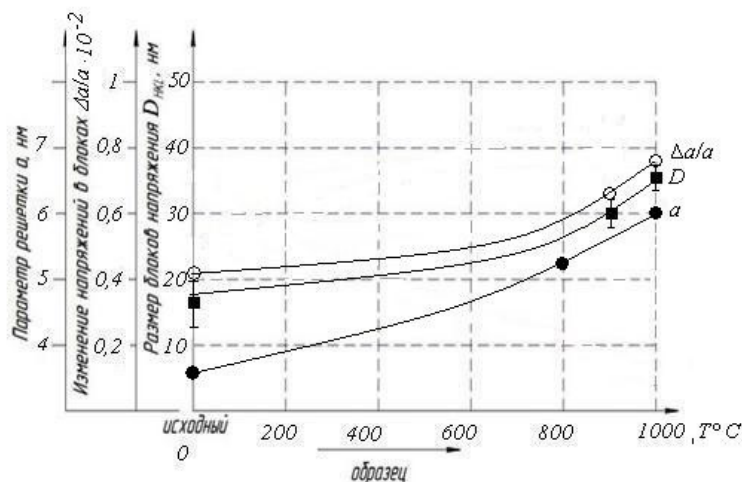


Рис. 7. Изменение параметров решетки, блоков и напряжений в блоках сплавов на основе WC-Co в зависимости от температуры ионного азотирования

Fig. 7. Changes in lattice parameters, blocks and stresses in blocks of alloys based on WC-Co depending on the temperature of ion nitriding

Изучение изменений напряженного состояния в поверхностных слоях твердосплавных изделий проводили на основе рентгеноструктурного анализа методом аппроксимации.

На рис. 7 показано увеличение периода «а» решетки карбида вольфрама и микроискажений «ε» и уменьшение размеров « D_{HKL} » блоков.

На основании, проведенной работы можно сделать предварительное заключение, что высокотемпературное ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С обеспечивает повышение режущих свойств твердого сплава ВК8 от 1,5 до 3 раз. Например, износ исходной пластины по передней грани после 5 проходов составляет 0,2-0,25 мм, а после ионного азотирования, 2 ч, $T_{\text{хто}} = 900$ °С износ пластины по передней грани составляет 0,08. Повышение температуры ионного азотирования до 1000 °С уменьшает износ после 5 проходов до 0,02 мм.

Выводы

1. Изучена микроструктура твердого сплава ВК8 и толщина диффузионного слоя после высокотемпературного ионного азотирования. Толщина слоя составляет от 2,23 до 2,5 мкм и мало зависит от повышения температуры с 900 °С до 1000 °С.

2. По методу наименьших квадратов для каждой кривой испытания твердых сплавов на деформацию после высокотемпературного ионного азотирования выбираем интервал изменения нагрузки и определяем прогиб, затем подсчитываем значение модуля упругости. При анализе выявляем, что ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С снижает модуль упругости на 23,4 % материала ВК8 по сравнению с исходным.

3. На стойкость твердых сплавов группы ВК влияет фазовый состав поверхностных слоев после высокотемпературного ионного азотирования от 900 °С до 1000 °С, а также его структурные характеристики – период решетки фазовых составляющих, размеры блоков и микроискажения. Увеличение периода решетки карбида вольфрама и микроискажений происходит одновременно с уменьшением размера блоков.

4. На основании, проведенной работы можно сделать предварительное заключение, что высокотемпературное ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С, обеспечивает повышение режущих свойств твердого сплава ВК8 от 1,5 до 3 раз. Например, износ исходной пластины по передней грани после 5 проходов составляет 0,2-0,25 мм, а после ионного азотирования, 2 ч, $T_{\text{хто}} = 900$ °С износ пластины по передней грани составляет 0,08. Повышение температуры ионного азотирования до 1000 °С уменьшает износ после 5 проходов до 0,02 мм.

Требуется дальнейшее проведение исследований на стойкость, многократное испытание на износ и резание до потери режущих свойств, которое проводится в данное время на ООО "Технология", г. Оренбург.

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. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 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] **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 (2018) 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 (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. *12. 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) (2018) 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) (2010) 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) (2018) 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

ГАРИПОВ Владимир Станиславович – доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.

E-mail: vladimir.garipov@mail.ru

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

Дата поступления статьи в редакцию: 20.04.2021

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. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2018) 301–305.
- [3] **S.I. Bogodukhov**, Vysokotemperaturnoye ionnoye azotirovaniye tverdospilavnykh 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 splavov 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. byudzhet. obrazovat. 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. byudzhet. obrazovat. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gos. un-t".- № 2019116142 zayavl. 27.05.2019 opubl. 12.11.2020, 19 (2020).
- [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 (2018) 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 (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] **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) (2010) 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) (2018) 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

GARIPOV Vladimir S. – *Orenburg State University.*

E-mail: vladimir.garipov@mail.ru

SVIDENKO Ekaterina V. – *Orenburg State University.*

E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Received: 20.04.2021