



Оригинальная статья

УДК 621.793.184:621.762.8

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-870-876



ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Т. Н. Осколкова¹, А. М. Глезер^{2,3}, А. С. Симачев¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)³ Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9, стр. 2)

Аннотация. Представлены результаты проведенного с использованием концентрированных потоков энергии поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов. На твердый сплав ВК10КС способом электродной обработки наносится сплав ВК6-ОМ толщиной 20 мкм. При этом получается поверхностный упрочненный слой, состоящий из W_2C . Твердость получаемого слоя составляет 22 000 МПа, коэффициент трения 0,23 (по сравнению с коэффициентом трения исходного твердого сплава 0,41), сохраняется прочная, но недостаточно износостойкая основа. В работе способом однокомпонентного электровзрывного легирования титаном был получен поверхностный слой на твердом сплаве ВК10КС толщиной 40 мкм, фазовый состав TiC , W_2C . Нанотвердость данного слоя 25 000 МПа, коэффициент трения 0,14. На твердом сплаве ВК10КС способом многокомпонентного электровзрывного легирования титаном совместно с бором получен поверхностный слой толщиной 3 – 4 мкм фазовым составом TiB_2 , TiC , W_2C . Нанотвердость упрочненного слоя 27 500 МПа, коэффициент трения 0,10. Применяя методику отдельных катодов, на поверхность твердого сплава ВК10КС было нанесено ионно-плазменное $TiN + ZrN$ покрытие (50 % $Ti + 50$ % Zr) толщиной 20 мкм. В качестве реакционного газа использовался азот. Нанотвердость упрочненного таким способом поверхностного слоя составляет 38 500 МПа, коэффициент трения 0,07. Ионно-плазменное $TiN + ZrN$ покрытие обладает хорошей адгезией с основой. Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава ВК10КС дает возможность выбора одного из методов упрочнения исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента, продлить его эксплуатационный срок; сэкономить дефицитные материалы (вольфрам и кобальт).

Ключевые слова: поверхностная обработка, сплав, микроструктура, нанотвердость, износ, коэффициент трения, трек износа, фазы

Для цитирования: Осколкова Т.Н., Глезер А.М., Симачев А.С. Поверхностное упрочнение твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама концентрированными потоками энергии // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 870–876.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>

Original article

SURFACE HARDENING OF CARBIDE TOOLS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE BY CONCENTRATED ENERGY FLOWS

T. N. Oskolkova¹, A. M. Glezer^{2,3}, A. S. Simachev¹¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)³ I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy (23/9, bld. 2 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of surface hardening of tungsten-carbide hard alloys carried out using concentrated energy flows. The VK6-OM alloy with a thickness of 20 μm is applied to the hard alloy VK10KS by the method of electric spark treatment. In this case, a surface hardened layer consisting of W_2C is obtained. The hardness of the resulting layer is 22,000 MPa and the friction coefficient is 0.23 (compared to the friction coefficient of the original hard alloy of 0.41); strong but insufficiently wear-resistant base is preserved. In the work, a surface layer on a hard alloy VK10KS with a thickness of 40 μm and phase composition of TiC and W_2C was obtained by the method of single-component electro-explosive alloying with titanium. The nanohardness of this layer is 25,000 MPa and the friction coefficient is 0.14. A surface layer with thickness of 3 – 4 μm and phase composition of TiB_2 , TiC , W_2C was obtained on the hard alloy VK10KS by the method of multicomponent electro-explosive alloying with titanium and boron. The nanohardness of the hardened layer is 27,500 MPa and the friction coefficient is 0.10. Applying the technique of separate cathodes, an ion-plasma $TiN + ZrN$ coating (50 % $Ti + 50$ % Zr) with a thickness of 20 μm was applied to the surface of the VK10KS hard alloy. Nitrogen was used as the reaction gas. The nanohardness of the surface layer hardened in this way is 38,500 MPa and the friction coefficient of is 0.07. Ion-plasma $TiN + ZrN$ coating has good adhesion to the substrate. The use of the proposed methods of surface hardening of VK10KS hard alloy makes it possible

to choose one of the hardening methods, based on operating conditions of the carbide tool, to extend its operational life, as well as to save scarce materials (tungsten and cobalt).

Keywords: surface treatment, alloy, microstructure, nanohardness, wear, friction coefficient, wear track, phases

For citation: Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of carbide tools based on tungsten carbide by concentrated energy flows. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 870–876. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>

ВВЕДЕНИЕ

Во многих производственных процессах (машиностроение, горнодобывающая, деревообрабатывающая промышленность и т.д.) применяются карбидовольфрамовые твердые сплавы. Однако эти сплавы подвержены износу и не всегда удовлетворяют требованиям по эксплуатационной стойкости.

В работах отечественных [1 – 5] и зарубежных [6 – 11] специалистов с целью создания износостойких поверхностных слоев твердых сплавов группы ВК предлагается использовать различные покрытия, применять обработку поверхности импульсным лазерным лучом, модифицировать поверхности твердых сплавов мощными ионными пучками и т.д. В настоящей работе рассматривается возможность повышения поверхностной твердости, износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов с использованием концентрированных потоков энергии, что является актуальной научно-практической задачей. Новые знания позволят разобраться в процессах структурообразования при различных видах обработки и дадут возможность прогнозировать механические свойства твердых сплавов в целом.

Целью работы явилось поверхностное упрочнение карбидовольфрамовых твердых сплавов (применяемых для бурового, горно-режущего, штампового и металло-режущего инструментов) с использованием технологий поверхностного упрочнения способами электроискровой обработки, электровзрывного легирования (ЭВЛ) и ионно-плазменного напыления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структуры исследовали с помощью оптического микроскопа OLIMPUS-GX 50, растрового электронного микроскопа «Philips SEM 515» и просвечивающего электронного микроскопа Tescan 20 G2 TWIN.

Испытания на износостойкость проводили на установке «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов был оценен путем измерения глубины и площади трека, образованного в результате действия неподвижного алмазного индентора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, числе оборотов 4000 (при определении износостойкости ионно-плазменного покрытия число оборотов составляло 12 000), линейной скорости движения 2,5 см/с. Глубину, площадь трека износа, коэффициент трения определяли с помощью высокоточной измерительной установки «Micro Measure 3D station» с программным

обеспечением. Анализ полученных профилей осуществлен с использованием компьютерной программы Mountains Map Universal (версия 2.0.13). Результаты трибологических испытаний представлены как среднеарифметические значения, полученные от 10 испытаний по одному режиму обработки на трех образцах.

Наноиндентирование осуществляли на установке «Nano Hardness Tester».

Рентгенографические исследования проводились с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 с железным K_{α} -излучением.

Адгезию ионно-плазменного TiN + ZrN покрытия на твердом сплаве ВК10КС изучали по методике «царапания» алмазным индентором на установке Micro Scratch Tester. На алмазный индентор действовала линейно-возрастающая нагрузка. За характеристику адгезионной прочности брали нагрузку в момент начала отслаивания покрытия, которое определяли с помощью акустического датчика и датчика глубины проникновения индентора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Способом электроискровой обработки было проведено упрочнение поверхности твердого сплава ВК10КС. В процессе такой обработки при искровом разряде происходит эрозия электрода и перенос продуктов эрозии на деталь. В результате на поверхности детали образуется упрочненный слой с измененным химическим составом и структурой. Высокая (5000 – 10 000 °С) температура разряда, кратковременность действия (10^{-6} – 10^{-3} с), мгновенное охлаждение нагретых участков способствуют протеканию сверхскоростной закалки. Происходит капельный перенос легирующих элементов из упрочняющего электрода на обрабатываемую поверхность [12].

В качестве электрода использовали твердый сплав ВК6-ОМ, произведенный в соответствии с ГОСТ 3884 – 74. Обработку поверхности твердого сплава ВК10КС осуществляли с помощью переносной установки электроискрового легирования UR-121 производства «Инструментальный завод» ОАО «Концерн Подольск» по двойному технологическому режиму: 0,55 мин/1 см² по режиму Norma 3; 1,0 мин/1 см² по режиму Turbo.

На рис. 1, а представлена микроструктура сплава ВК10КС с упрочненным слоем из ВК6-ОМ после электроискровой обработки. Наблюдается плохо травящийся слой толщиной 20 мкм. На поверхности твердого

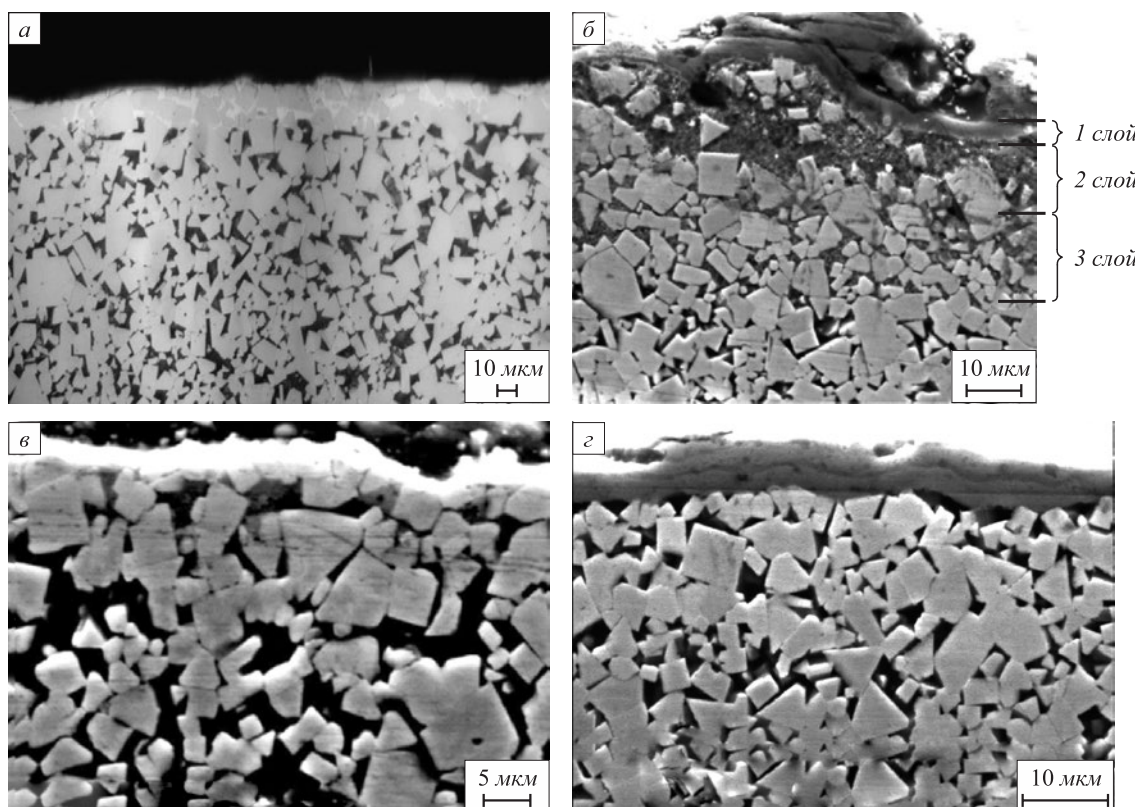


Рис. 1. Микроструктура сплава ВК10КС после различных обработок

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after various treatments

сплава после электроискровой обработки рентгенофазовыми исследованиями выявлено наличие мелкодисперсного карбида вольфрама W_2C (рис. 2) с более высокой твердостью по сравнению с твердостью карбида WC [13] (см. таблицу).

Упрочнение поверхности твердых сплавов группы ВК возможно при использовании импульсного плазменного воздействия, которым является ЭВЛ. При ЭВЛ плазменный ускоритель накапливает энергию батарей

импульсных конденсаторов до 10 кДж, а затем разряжается в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. Источником тепла и легирующих элементов для обрабатываемой поверхности является импульсная многофазная плазменная струя, которая формируется из материала взрываемого проводника. Такой проводник закрепляется на электродах плазменного ускорителя [14]. В работе в качестве взрываемого проводника применяли титан (в виде фольги

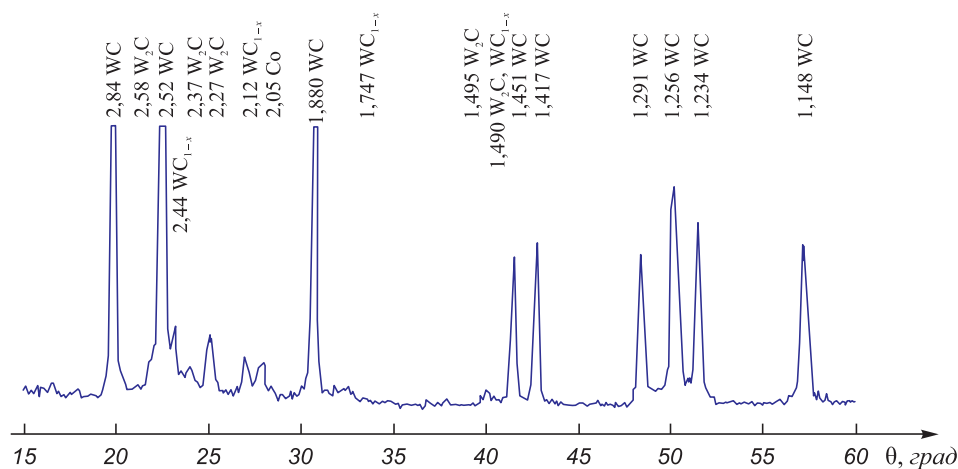


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы твердого сплава ВК10КС после электроискровой обработки

Fig. 2. Fragments of the diffractogram of VK10KS alloy after electric spark treatment

Свойства сплава ВК10КС после упрочняющей обработки

Properties of VK10KS alloy after hardening treatment

Способ обработки	Нанотвердость поверхностного слоя, МПа	Глубина трека износа, мкм	Площадь трека износа, мкм ²	μ	Фазовый состав поверхностного слоя
Электроискровая обработка	22 000	10,800	941,0	0,23	W ₂ C
ЭВЛ (титан)	25 000	5,400	243,0	0,14	TiC, W ₂ C
ЭВЛ (титан + бор)	27 500	242,000	155,0	0,10	TiB ₂ , TiC, W ₂ C
Ионно-плазменное покрытие (TiN + ZrN)	38 500	0,097	4,2	0,07	TiN + ZrN
Исходный сплав	–	58,000	12 921,0	0,41	WC, β-Co

толщиной 20 мкм массой 40 мг из расчета на 15 см² обрабатываемой поверхности).

Дополнительно упрочнить поверхность карбидовольфрамовых твердых сплавов можно путем совместного взрыва проводников с порошками тугоплавких соединений. В настоящей работе на поверхности твердого сплава ВК10КС за счет совместного электровзрыва титана с порошком бора был получен упрочненный слой [15]. Использовали порошок аморфного бора марки А с размерами частиц 5 мкм. Массу порошка аморфного бора выбирали из расчета 60 мг на 15 см² обрабатываемой поверхности.

Обработка поверхности твердого сплава ВК10КС проводилась при поглощаемой плотности мощности 6,0 ГВт/м² (диаметр d внутреннего электрода составлял 15 мм; диаметр d_0 канала сопла 10 мм; расстояние x от облучаемой поверхности до среза сопла 20 мм; величина зарядного напряжения U составляла 2,3 кВ). При облучении поверхность оплавляется, происходит интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность.

На рис. 1, б, в представлены фотографии микроструктур после ЭВЛ титаном и титаном совместно с бором.

На поверхности при ЭВЛ титаном формируется плохо травящийся сплошной слой l толщиной 3 – 4 мкм (рис. 1, б). С помощью рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии установлено, что данный слой состоит из карбида TiC. Под верхним слоем располагается слой 2 с мелкодисперсной структурой, состоящий из карбидов W₂C и WC. Глубже расположен слой 3, где с помощью растровой электронной микроскопии выявлены изменения химического состава только кобальтовой связующей, которая дополнительно легируется титаном, вольфрамом и углеродом [16]. Общая глубина зоны с измененной структурой составляет 30 – 40 мкм.

При изменении фазового состава поверхностного слоя повышаются твердость и износостойкость твердого сплава в целом (см. таблицу).

При поверхностной обработке твердого сплава электровзрывом титана с бором образуется плохо

травящийся упрочненный слой толщиной 2 – 3 мкм с выявленными электронной микроскопией скоплениями дислокаций (рис. 3). Этот слой плавно переходит в основу сплава без образования микротрещин (рис. 1, в). По данным рентгенофазового анализа этот слой состоит из легированного карбида титана (Ti, W)C (30 %), бориды титана TiB₂ (15 %), карбидов W₂C (20 %) и WC (35 %) (рис. 4).

При наноиндентировании наблюдается увеличение поверхностной твердости при электровзрыве титана с бором до 27 500 МПа. Это связано с формированием бориды титана TiB₂ (см. таблицу).

Изменение трибологических характеристик поверхностного слоя после ЭВЛ титаном совместно с бором по сравнению с исходным состоянием сплава ВК10КС показано в таблице.

Для металлообрабатывающей промышленности очень важно повышение срока службы режущего инструмента. Эффективным решением этой задачи является поверхностное упрочнение неперетачиваемых режущих пластин из твердых сплавов.

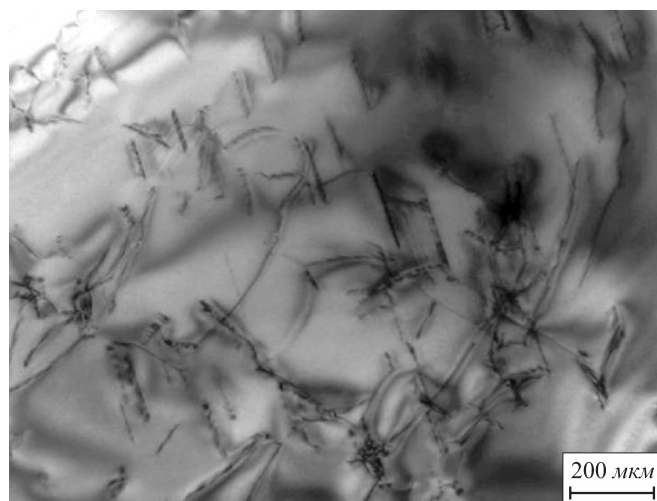


Рис. 3. Структура поверхности сплава ВК10КС после электровзрывной обработки титаном с бором

Fig. 3. Structure of the surface of VK10KS alloy after electro-explosive treatment by titanium and boron

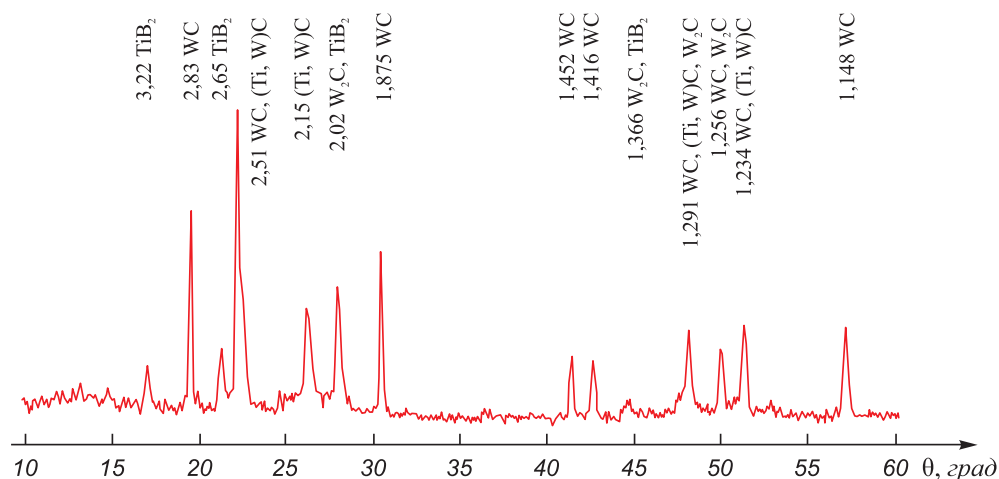


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы сплава BK10KC после электровзрывного легирования титаном совместно с бором

Fig. 4. Fragment of the diffractogram of VK10KS alloy after electro-explosive alloying by titanium and boron

Используются различные способы поверхностного упрочнения твердосплавного инструмента, одним из которых является ионно-плазменное напыление [17 – 20]. В современной практике поверхностного упрочнения твердосплавного инструмента применяются покрытия, содержащие TiC, TiN, которые обладают высокими температурой плавления и твердостью. Однако и такие покрытия не лишены недостатков, один из них – невозможность обработки титановых и других труднообрабатываемых сплавов. Также резко снижаются защитные свойства покрытий при высокой скорости резания из-за их невысокой трещиностойкости. Вызывает интерес введение в состав покрытия TiN циркония, так как предположительно именно цирконий должен повышать теплостойкость, снижать хрупкость при одновременном повышении твердости покрытия [3, 17].

По методике раздельных катодов на поверхность твердого сплава BK10KC в камере установ-

ки «Квант-6» с рабочим давлением $6,0 \cdot 10^{-3}$ Па было нанесено ионно-плазменное TiN + ZrN покрытие (50 % Ti + 50 % Zr) толщиной 20 мкм (рис. 5). В качестве реакционного газа использовали азот. Ионное осаждение осуществляли при энергии ионных потоков 100 эВ, отрицательном напряжении 160 В и токе фокусирующей катушки 0,3 – 0,4 А. Два катода из титанового сплава располагали в камере установки друг против друга, а катод из циркониевого сплава – между ними.

Микроструктура сплава BK10KC с ионно-плазменным покрытием TiN + ZrN толщиной 20 мкм представлена на рис. 1, 2. В покрытии наблюдается явно выраженная микрослоистость. Введение в состав покрытия TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости до 38 500 МПа (см. таблицу).

При исследовании адгезионной прочности нанесенного ионно-плазменного покрытия TiN + ZrN с основной определено, что при приложении нагрузки 56,6 Н

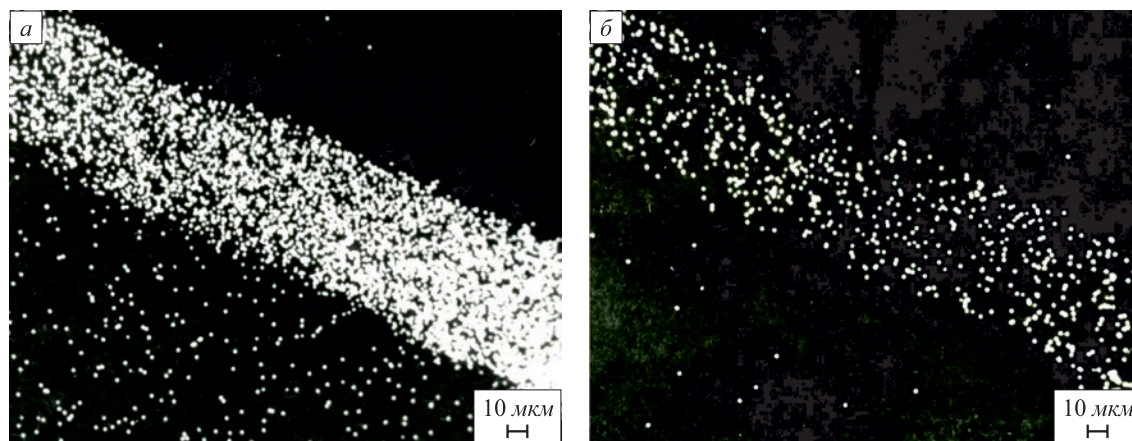


Рис. 5. Микроструктура сплава BK10KC с ионно-плазменным TiN + ZrN покрытием в характеристических рентгеновских излучениях титана (а) и циркония (б)

Fig. 5. Microstructure of VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating in characteristic X-rays of titanium (a) and zirconium (b)

наблюдается одновременный скачок сигналов акустической эмиссии и силы трения, соответствующий моменту начала отслоения покрытия. Такие показатели нагрузки свидетельствуют о высокой адгезионной прочности ионно-плазменного TiN + ZrN покрытия с твердосплавной основой, которая объясняется микро-слоистостью самого покрытия: граница между микро-слоями покрытия тормозит рост трещины при внедрении в него индентора.

Выводы

Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава BK10KC дает возможность выбора одного из методов упрочнения, исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента. Возможны продление эксплуатационного срока инструмента и экономия дефицитных материалов (вольфрама и кобальта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Упрочнение твердых сплавов (обзор) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. Т. 131. № 11. С. 3–11.
3. Иванов А.Н., Хмелевская В.С., Антошина И.А., Коршунов А.Б. Структурные изменения в твердом сплаве BK8 при ионном облучении // Перспективные материалы. 2003. № 1. С. 89–92.
4. Петренко П.В., Грабовский Ю.Е., Грицкевич А.Л., Кулиш Н.П. Структурно-фазовые превращения в твердых сплавах WC–Co при облучении низкотоковым электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 3. С. 29–39.
5. Тимошников Ю.А., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф. Изменение структурно-фазового состояния сплава BK8 под воздействием потока гамма-квантов // Известия вузов. Черная металлургия. 2001. № 4. С. 40–43.
6. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Mechanism of hard-facing alloys WC–Co boronizing with rare-earth metals // Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng. Rare Metal Materials and Engineering. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305–308.
7. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Phase analysis of cemented carbide WC–Co boronized with yttrium // Journal of Rare Earths. 2002. Vol. 40. No. 4. P. 287–290.
8. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni–P–WC nanocomposite coatings // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16–17. P. 7246–7251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.035>
9. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>
10. Jedrzejowski P., Klemberg-Sapieha J.E., Martinu L. Relationship between the mechanical properties and the microstructure of nanocomposite, TiN/SiN₃ coatings prepared by low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition // Thin Solid Films. 2003. Vol. 426. P. 150–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00028-2)
11. Mayrhofer P.H., Kunc F., Musil J., Mitterer C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings // Thin Solid Films. 2002. Vol. 415. No. 1–2. P. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00511-4)
12. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. No. 1. Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012019>
13. Тюрин Ю.Н., Кульков С.Н., Колисниченко О.В., Дуда И.М. Импульсно-плазменное модифицирование поверхности изделия из сплава WC + 20 % Co // Физическая инженерия поверхности. 2009. Т. 7. № 3. С. 262–267.
14. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. Vol. 55. No. 2. P. 196–200. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020138>
1. Tabakov V.P. Formation of Wear-Resistant Ion-Plasma Coatings of Cutting Tools. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 311 p. (In Russ.).
2. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Hardening of hard alloys (Review). Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2015, vol. 131, no. 11, pp. 3–11. (In Russ.).
3. Ivanov A.N., Khmelevskaya V.S., Antoshina I.A., Korshunov A.B. Structural changes in hard alloy VK8 under ion irradiation. Perspektivnye materialy. 2003, no. 1, pp. 89–92. (In Russ.).
4. Petrenko P.V., Grabovskii Yu.E., Gritskovich A.L., Kulish N.P. Structural-phase transformations in WC–Co hard alloys under irradiation with a low-current electron beam. Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2003, no. 3, pp. 29–39. (In Russ.).
5. Timoshnikov Yu.A., Klopotov A.A., Ivanov Yu.F. Variation of structure-phase state of VK8 alloy under action of gamma quanta. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2001, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).
6. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Mechanism of hard-facing alloys WC–Co boronizing with rare-earth metals. Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng. Rare Metal Materials and Engineering. 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
7. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Phase analysis of cemented carbide WC–Co boronized with yttrium. Journal of Rare Earths. 2002, vol. 40, no. 4, pp. 287–290.
8. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni–P–WC nanocomposite coatings. Surface & Coatings Technology. 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7246–7251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.035>
9. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. Thin Solid Films. 2005, vol. 476, pp. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>
10. Jedrzejowski P., Klemberg-Sapieha J.E., Martinu L. Relationship between the mechanical properties and the microstructure of nanocomposite, TiN/SiN₃ coatings prepared by low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition. Thin Solid Films. 2003, vol. 426, pp. 150–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00028-2)
11. Mayrhofer P.H., Kunc F., Musil J., Mitterer C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings. Thin Solid Films. 2002, vol. 415, no. 1–2, pp. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00511-4)
12. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, vol. 91, no. 1, article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012019>
13. Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V., Duda I.M. Pulsed plasma modification of the surface of a WC + 20 % Co alloy product. Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2009, vol. 7, no. 3, pp. 262–267. (In Russ.).
14. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 196–200. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020138>

15. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC–Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 146–154. <https://doi.org/10.1134/S2075113319010258>
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A. Pulse plasma treatment of the surface of alloy VK10KS // *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 53. No. 11–12. P. 608–610. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9443-1>
17. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спечённых твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2004. 464 с.
18. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 9. С. 9–18.
19. Яценко А.С., Марчук С.И. Изучение коррозионной стойкости твердых сплавов с покрытием нитрид титана. В кн.: *Металловедение черных и цветных сплавов*. Сб. науч. тр. Вып. 9. Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2003. С. 29–33.
20. Патент № 2270270 РФ, МПК С 23 С 14/06, С 23 С 14/48. Режущий инструмент с многослойным покрытием / В.П. Табаков, А.В. Циркин, А.В. Чихранов. Заявл. 25.05.2004; опубл. 20.02.2006. Бюл. № 5.
15. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC–Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 146–154. <https://doi.org/10.1134/S2075113319010258>
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A. Pulse plasma treatment of the surface of alloy VK10KS. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 53, no. 11–12, pp. 608–610. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9443-1>
17. Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.A. *Technology and Properties of Special Hard Alloys and Products from Them*. Moscow: MISiS, 2004, 464 p. (In Russ.).
18. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improving the tool efficiency by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russ.).
19. Yatsenko A.S., Marchuk S.I. Study of corrosion resistance of hard alloys coated with titanium nitride. In: *Metal Science of Ferrous and Non-Ferrous Alloys. Transactions*. Issue 9. Donetsk: Donetskii nats. tekhn. un-t, 2003, pp. 29–33. (In Russ.).
20. Tabakov V.P., Tsirkin A.V., Chikhranov A.V. *Cutting tool with multilayer coating*. Patent RF no. 2270270. *Bulleten' izobretenii*. 2006, no. 5. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: oskolkova@kuz.ru

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: oskolkova@kuz.ru

Александр Маркович Глезер, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», директор научного центра «Металловедение и физика материалов», Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина
E-mail: a.glezer@mail.ru

Aleksandr M. Glezer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Director of the Scientific Center "Metal Science and Physics of Materials", I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy
E-mail: a.glezer@mail.ru

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021
 После доработки 21.10.2021
 Принята к публикации 25.10.2021

Received 11.10.2021
 Revised 21.10.2021
 Accepted 25.10.2021