

Оригинальная статья

УДК 669.018.25:621.793.184.762.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ
ТВЕРДОГО СПЛАВА VK10KS**

© 2022 г. Т. Н. Осколкова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены результаты исследований твердого сплава VK10KS после различных поверхностных обработок (используя концентрированные потоки энергии). Ионно-плазменное покрытие TiN + ZrN из отдельных катодов титана и циркония наносили с помощью установки Квант-6. Катод из сплава циркония располагался в камере между двумя катодами из сплава титана. Металлографически после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN выявлен плохо травящийся слой толщиной 15 мкм, состоящий из микрослоев. Обнаруженные на дифрактограммах две фазы (TiN и ZrN) в покрытии подтверждает микрослоистость его структуры, которая будет способствовать повышению адгезии самого покрытия с твердосплавной основой. Граница между микрослоями покрытия будет тормозить рост трещины. Установлено, что введение в состав покрытия соединения TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости на 23 % (до 39 ГПа). Электроискровую обработку проводили на установке UR – 121. Она состоит из эрозии упрочняющего электрода при искровом разряде. При этом происходит перенос продуктов эрозии на деталь. В качестве электрода применялся твердый сплав VK6-OM. Рентгенофазовым анализом выявлено наличие на поверхности твердого сплава VK10KS вновь образующейся фазы с высокой твердостью (карбид дивольфрама W_2C), у которого твердость больше, чем у карбида вольфрама WC. Наноиндентирование сплава VK10KS после электроискровой обработки показало повышение поверхностной твердости до 22 ГПа. Методом электровзрывного легирования (ЭВЛ) титаном и бором на твердом сплаве VK10KS получен упрочненный поверхностный слой, состоящий из диборида титана TiB_2 , карбидов TiC, W_2C с нанотвердостью 28 ГПа. Суть ЭВЛ заключается в накоплении энергии батарей импульсных конденсаторов до 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. При этом происходит нагрев обрабатываемой поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой из-за отвода тепла в окружающую среду и вглубь материала.

Ключевые слова: твердый сплав, структура, искровая обработка, ионно-плазменное покрытие, электровзрывная обработка

Для цитирования: Осколкова Т.Н. Разработка способов поверхностного упрочнения твердого сплава VK10KS // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 47 – 53. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-47-53](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53)

Original article

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR SURFACE HARDENING
OF HARD ALLOY VK10KS**

© 2022 T. N. Oskolkova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The results of studies of the VK10KS hard alloy after various surface treatments (using concentrated energy flows) are presented. The TiN + ZrN ion-plasma coating from separate titanium and zirconium cathodes was applied using the Kvant-6 installation. The zirconium alloy cathode was located in a chamber between two titanium alloy cathodes. Metallographically, after applying an ion-plasma coating of TiN + ZrN composition, a poorly etched layer

with a thickness of 15 microns consisting of microlayers was revealed. The two phases (TiN and ZrN) found in the diffractograms in the coating confirm the micro-thickness of its structure, which will help to increase the adhesion of the coating itself with a carbide base. The boundary between the micro-layers of the coating will inhibit the growth of the crack. It was found that the introduction of zirconium TiN compound into the coating leads to an increase in nanohardness by 23% (up to 39 GPa). Electric spark treatment was carried out on the UR – 121 installation. It consists of erosion of the hardening electrode during spark discharge. At the same time, the erosion products are transferred to the part. A hard alloy VK6-OHM was used as the electrode. X-ray phase analysis revealed the presence on the surface of the hard alloy VK10KS of a newly formed phase with high hardness (divolfram carbide W_2C), which has a hardness greater than that of tungsten monocarbide WC. Nanoindentation of the VK10KS alloy after electric spark treatment showed an increase in surface hardness up to 22 GPa. A hardened surface layer consisting of titanium diboride TiB_2 , carbides TiC, W_2C with a nanohardness of 28 GPa was obtained by electroexplosive alloying (EVL) with titanium and boron on a hard alloy VK10KS. The essence of EVL is the accumulation of energy by a battery of pulse capacitors up to 10 kJ and its subsequent discharge within 100 microseconds through a conductor that experiences explosive destruction. At the same time, the treated surface is heated and saturated with explosion products, followed by self-quenching due to heat removal into the environment and deep into the material.

Keywords: hard alloy, structure, spark treatment, ion-plasma coating, electro-explosive treatment

For citation: Oskolkova T.N. Development of methods for surface hardening of hard alloy VK10KS. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 47 – 53. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-47-53](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53)

Введение

Развитие многих отраслей в Российской Федерации связано с применением спеченных твердых сплавов, которые широко используют в качестве инструментальных материалов.

Сплавы WC – Co достаточно прочные из всех спеченных твердых сплавов, но не всегда удовлетворяют требованиям по износостойкости при сохранении вязкости. Повышения износостойкости инструмента из твердых сплавов можно добиться путем применения различных высокотехнологических методов поверхностного упрочнения [1 – 5]. Большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований по рассматриваемому вопросу получен и описан в работах [6 – 14]. Однако недостаточно изученным остается вопрос, связанный с применением концентрированных потоков энергии при поверхностной обработке твердых сплавов группы ВК. Новые данные по существующей проблеме при получении комплекса свойств поверхностных слоев твердых сплавов позволяют прогнозировать эксплуатационный срок твердосплавных изделий, а также представляют большой практический интерес.

В настоящей работе исследовали структуры и свойства поверхностных слоев твердого сплава ВК10КС после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN электроискровой обработки и обработки способом электровзрывного легирования (ЭВЛ).

Материалы, способы обработки и методы исследования

В исследованиях использовали твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Свердловская область).

Ионно-плазменное покрытие TiN + ZrN из отдельных катодов титана и циркония наносили с помощью установки Квант-6. Режим обработки следующий: энергия ионных потоков 100 эВ при отрицательном напряжении 160 В и токе фокусирующей катушки $0,3 \div 0,4$ А; давление камеры $6,0 \cdot 10^{-3}$ Па; реакционный газ – азот. Катод из сплава циркония располагали в камере между двумя катодами из сплава титана.

Электроискровую обработку проводили на установке UR – 121, которая состоит из эрозии упрочняющего электрода при искровом разряде. При этом происходит перенос продуктов эрозии на деталь. В качестве электрода применялся твердый сплав ВК6-ОМ. Упрочнение поверхности твердого сплава ВК10КС проводили с применением двойного режима установки: 0,55 мин/1 см² по режиму Norma 3 + 1,0 мин/1 см² по режиму Turbo. Подробное описание режимов и механизма обработки представлено в работе [15].

Для поверхностного упрочнения сплава ВК10КС применяли метод ЭВЛ. Суть этого метода заключается в накоплении энергии батареей импульсных конденсаторов до 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. При этом происходит нагрев обрабатываемой поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой из-за отвода тепла в окружающую среду и вглубь материала. Режим обработки при интенсивности воздействия $6,0$ ГВт/м² и величиной зарядного напряжения $U = 2,3$ кэВ обеспечивает оплавление поверхности и интенсивное конвективное

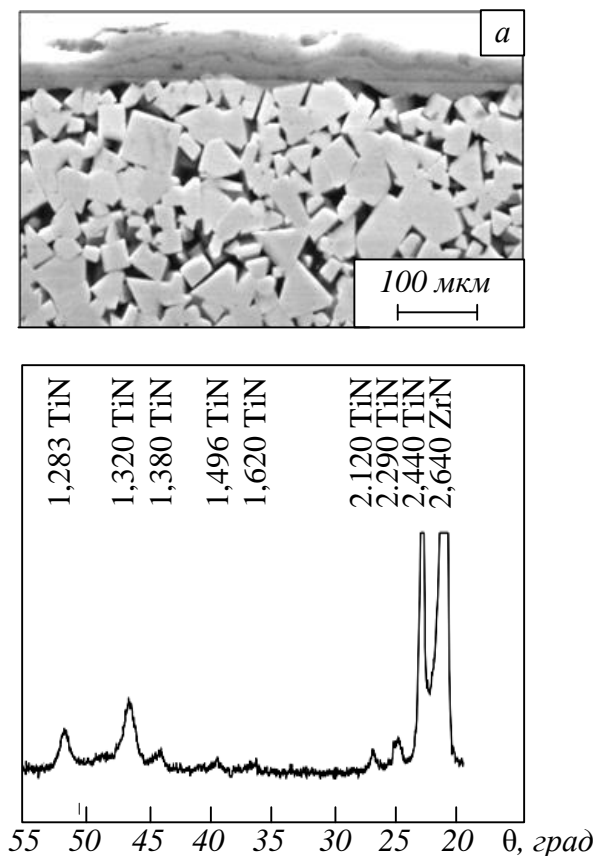


Рис. 1. Микроструктура (а) и фрагмент дифрактограммы (б) сплава ВК10КС с ионно-плазменным TiN + ZrN покрытием
 Fig. 1. Microstructure (a) and diffractogram fragment (b) of VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating

перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность.

Роль взрывающего проводника выполняла титановая фольга толщиной 20 мкм (из расчета на 15 см² обрабатываемой поверхности требуется 40 мг). Взрывая титан, можно получить на поверхности твердых сплавов группы ВК карбидов титана TiC основу твердых сплавов группы ТК.

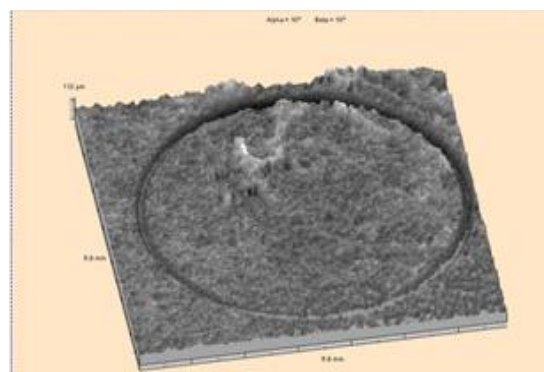
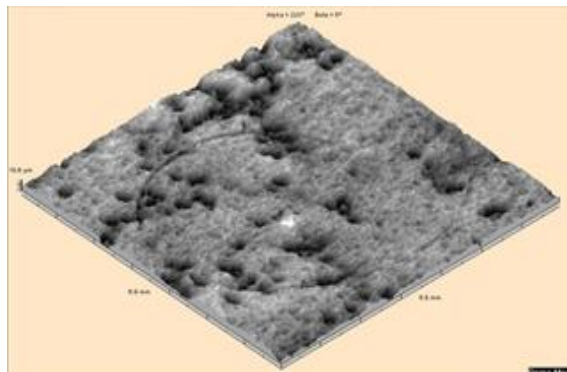


Рис. 2. Внешний вид треков при трибологических испытаниях:
 а – сплав ВК10КС с ионно-плазменными TiN + ZrN покрытием; б – исходный сплав
 Fig. 2. Appearance of tracks during tribological tests:
 а – VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating; б – initial alloy

Исследования микроструктуры после различных обработок проводили с использованием микроскопа Philips SEM 515, сканирующего электронного микроскопа EVO 50 XVP, просвечивающего электронного микроскопа Tescnaі 20 G2 TWIN с ускоряющим напряжением 200 кВ, рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0 с железным K_α-излучением. Свойства упрочненной зоны методом оценки нанотвердости осуществляли на приборе Nano Hardness Tester, методом оценки износостойкости – с помощью высокотемпературного трибометра PC-Operated High Temperature Tribometer.

Результаты исследования

Металлографически после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN выявлен плохо травящийся слой толщиной 10 ÷ 15 мкм, состоящий из микрослоев (рис. 1, а). Обнаруженные на дифрактограммах две фазы (TiN и ZrN) в покрытии подтверждает микрослоистость его структуры (рис. 1, б), которая будет способствовать повышению адгезии самого покрытия с твердосплавной основой. Граница между микрослоями покрытия будет тормозить рост трещины.

Установлено, что введение в состав покрытия TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости на 23 % (до 39 ГПа).

Износ образцов определялся на десяти образцах, измеряя глубину и площадь трека до и после обработки. Трек образуется в результате вращающихся действий алмазного индентора на неподвижный образец. Режим испытаний следующий: нагрузка на образец 3 Н; число оборотов 12000; линейная скорость движения 2,5 см/с (рис. 2). Для сравнения аналогичные испытания проводили на исходных образцах при таких же параметрах, но количестве оборотов 4000.

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменным покрытием показали, что пло-

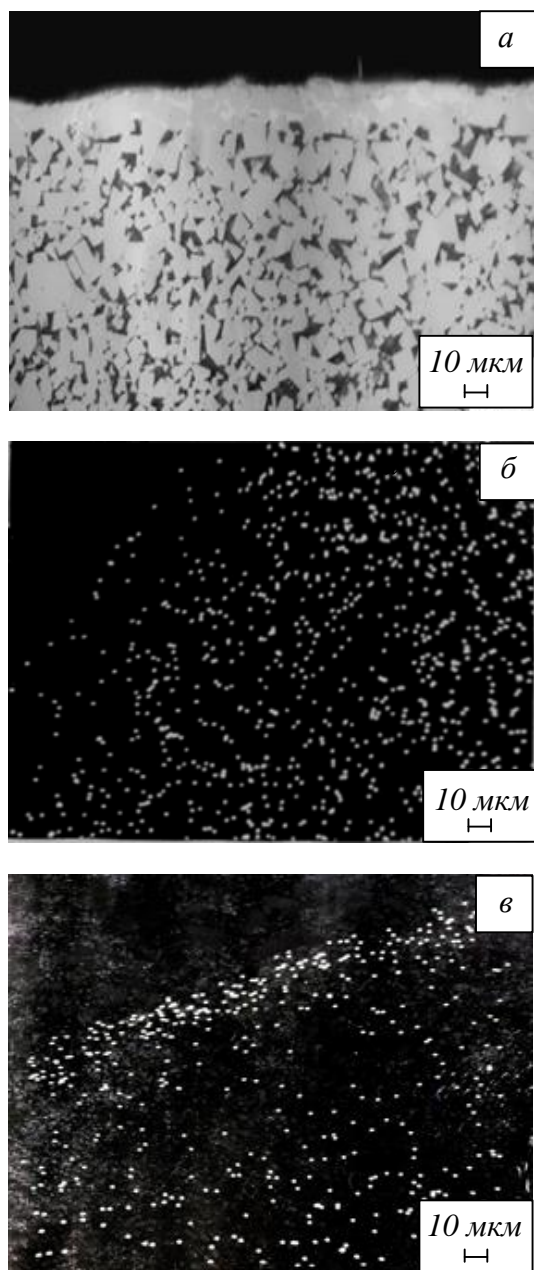


Рис. 3. Микроструктура сплава ВК10КС после электроискровой обработки (а) и в характеристических рентгеновских излучениях кобальта (б), вольфрама (в)

Fig. 3. The microstructure of the VK10KS alloy after electric spark treatment (a) and in the characteristic X-rays of cobalt (b), tungsten (c)

щадь трека износа с покрытием на сплавах составляет $4,2 \text{ мкм}^2$, на сплаве без покрытия – 12921 мкм^2 . Максимальная глубина трека у сплавов с покрытием составляет 97 нм, у исходного образца – 58 мкм. Высокая износостойкость ионно-плазменного покрытия TiN + ZrN на твердом сплаве ВК10КС достигается из-за формирующихся нитридов титана и циркония с высокими твердостями и согласуется с атомно-энергетической концепцией В.Ф. Моисеева.

Способом электроискровой обработки получена твердосплавная пластина, состоящая из более износостойкого слоя ВК6-ОМ и недостаточно износо-

стойкой основы ВК10КС (рис. 3, а). Результаты растровой электронной микроскопии показали градиентную структуру на сплаве ВК10КС: более высокое содержание вольфрама в поверхностном слое и пониженное кобальта (рис. 3, б, в).

Рентгенофазовым анализом выявлено наличие на поверхности твердого сплава ВК10КС вновь образующейся фазы с высокой твердостью (карбид дивольфрама W_2C), у которого твердость больше, чем у монокарбида вольфрама WC (рис. 4). Наноиндентирование сплава ВК10КС после электроискровой обработки показало повышение поверхностной твердости до 22 ГПа.

Трибологические испытания проводили по режимам, описанным выше, но при числе оборотов 4000. Глубина трека износа устанавливается на отметке 10,8 мкм (при исходной 58 мкм). Площадь сечения трека изношенных образцов после обработки и без нее составляет 941 и 12921 мкм^2 соответственно.

Электровзрывное легирование титаном совместно с порошком аморфного бора (размеры частиц бора 5 мкм) приводит к формированию на поверхности твердого сплава ВК10КС плохо травящейся зоны толщиной $1 \div 2 \text{ мкм}$ (рис. 5). Рентгенофазовым анализом установлено, что этот слой состоит из диборида титана TiB_2 , карбидов TiC, W_2C . Эти фазы обладают более высокой твердостью, чем исходные.

Ниже рассматриваемой зоны располагается зона толщиной $10 \div 15 \text{ мкм}$ с измельченными карбидами вольфрама, плавно переходящей в основной материал без формирования резкой границы между упрочненной зоной и сплавом ВК10КС (рис. 5).

После ЭВЛ просвечивающей электронной микроскопией (рис. 6) выявлены изменения, как в карбидной, так и кобальтовой фазах. В карбидной фазе обнаружена дислокационная структура. Кобальтовая фаза дополнительно легируется элементами взрывааемых проводников и основного материала. На фоне этого формируются мелкодисперсные частицы карбидов вольфрама, а также выявлены деформационные линии и дислокации. Дополнительное легирование кобальтовой фазы будет способствовать стабилизации ГЦК решетки и положительно влиять на эксплуатационную стойкость твердых сплавов на основе WC – Co.

Электровзрывное легирование титаном с бором приводит к формированию упрочненных поверхностных слоев с нанотвердостью 28 ГПа из-за формирования диборида титана TiB_2 . С увеличением поверхностной твердости возрастает износостойкость: глубина изношенного трека 2,42 мкм; площадь трека износа 155 мкм^2 по сравнению с исходными значениями (58 мкм

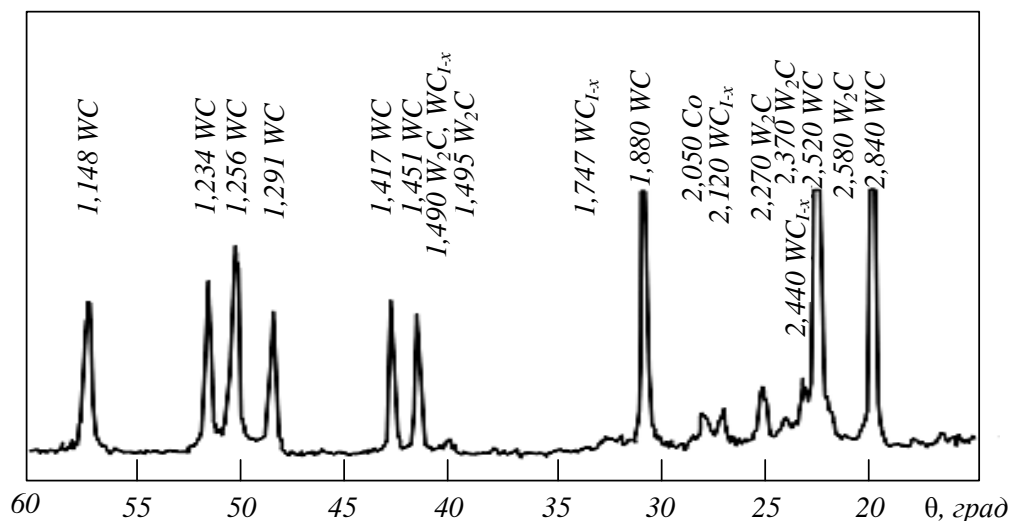


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы сплава ВК10КС после электронской обработки
 Fig. 4. Fragment of the diffractogram of the VK10KS alloy after electric spark treatment

глубина трека износа и 12921 мкм^2 площадь трека износа).

Выводы

На основе обобщения результатов экспериментальных исследований разработаны технологии поверхностного упрочнения твердых сплавов WC – Co с применением концентрированных потоков энергии, позволяющих повысить поверхностную твердость до 22 – 39 ГПа. Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава ВК10КС дает возможность выбора одного из методов упрочнения, исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента, и продлить его эксплуатационный срок, а также сэкономить дефицитные материалы (вольфрам и кобальт).

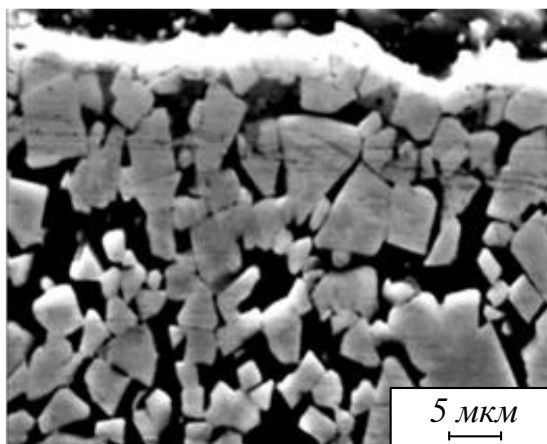


Рис. 5. Микроструктура сплава ВК10КС после ЭВЛ бором с титаном

Fig. 5. The microstructure of the VK10KS alloy after EVL boron with titanium

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. Москва: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. 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.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological of electroless Ni – P – WC nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16-17. P. 7246–7251.
4. Veprek S., Veprek-Hejman M., Kavrankova P. etc. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1–29.
5. Shourong L., Jianmin H., Liang C. etc. Mechanism of hard-facing alloy's WC – Co boronizing with rare-earth metals // Xiyou jinshu cailiao ya gongcheng. Rare Metal. Mater. and Eng. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305–308.
6. Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Ярьско С.И. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и карбидом кремния поверхности твердого сплава ВК10КС на его структуру и свойства // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 922–929.
7. Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «твердосплавная основа – износостойкое покрытие» // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 80–84.
8. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей

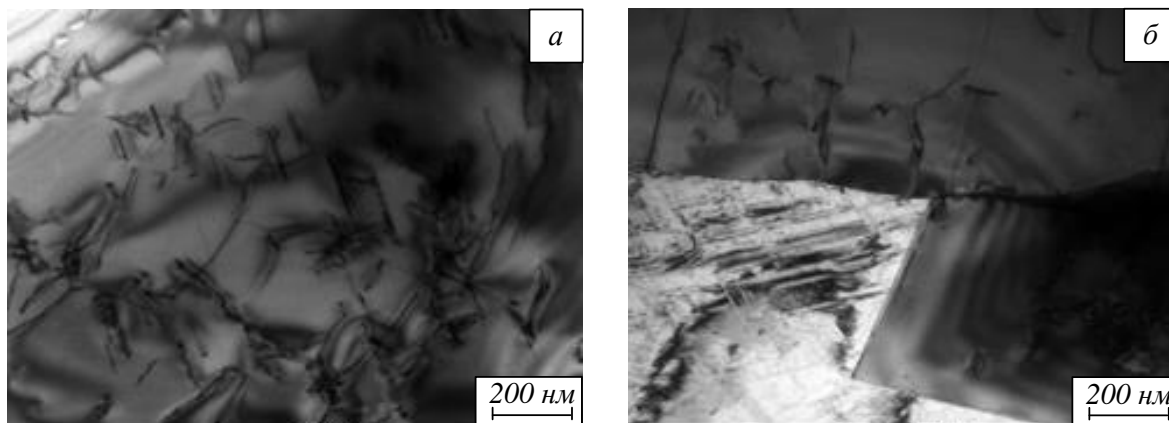


Рис. 6. Структура сплава VK10КС после электровзрывной обработки титаном с бором:

a – поверхность; *б* – на расстоянии 10 мкм от поверхности

Fig. 6. The structure of the VK10KS alloy after electroexplosion treatment with titanium with boron:

a – surface; *b* – at a distance of 10 microns from the surface

нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава Т15К6 // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76–84.

9. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брацихин А.А., Ягмуров М.А., Сугаров Х.Р. Исследование физико-механических свойств твердых сплавов ВК6, ВК8 и Т5К10, прошедших объемное импульсное лазерное упрочнение // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 3. С. 37–40.
10. Zhang F.G., Zhu X.P., Lei M.K. Surface characterization and tribological properties of WC – Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed electron beam // Vacuum. 2017. Vol. 137. P. 119–124.
11. Верещака А.А., Табаков В.П. Исследование влияния архитектуры многослойного покрытия на работоспособность твердосплавного инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 9 (177). С. 427–429.
12. Табаков В.П., Худобин Л.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 9 (165). С. 414–418.
13. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 2. P. 105–109.
14. Волхонский А.О., Блинков И.В., Аникин В.Н., Белов Д.С., Сергевнин В.С. Упрочне-

ние твердосплавного лезвийного инструмента, используемого для резания трудно-обрабатываемых титановых сплавов и хромоникелевых сталей, многослойными наноструктурными покрытиями // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 5. С. 64–73.

15. Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Исследование структуры и свойств твердого сплава VK10КС после электроискровой обработки // МиТОМ. 2022. № 6 (804). С. 36–39.

REFERENCES

1. Tabakov V.P. *Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools*. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 311 p. (In Russ.).
2. 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.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological of electroless Ni – P – WC nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, no. 16-17, pp. 7246–7251.
4. Veprek S., Veprek-Hejman M., Kavrankova P. etc. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 476, pp. 1–29.
5. Shourong L., Jianmin H., Liang C. etc. Mechanism of hard-facing alloy's WC – Co boronizing with rare-earth metals. *Xiyou jinshu cailiao ya gongcheng. Rare Metal. Mater. and Eng.* 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
6. Oskolkova T.N., Simachev A.S., Yares'ko S.I. The effect of pulsed plasma modification by titanium and silicon carbide of the surface of a hard alloy VK10KS on its structure and prop-

- erties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 922–929. (In Russ.).
7. Sizov S.V., Tabakov V.P. Modeling of the impact of pulsed laser treatment on the composition "carbide base – wear-resistant coating". *Vestnik mashinostroeniya*. 2019, no. 6, pp. 80–84. (In Russ.).
 8. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Investigation of the influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the performance properties of T15K6 hard alloy plates. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2018, no. 2, pp. 76–84. (In Russ.).
 9. Pinakhin I.A., Chernigovskii V.A., Bratsikhin A.A., Yagmurov M.A., Sugarov Kh.R. Investigation of the physico-mechanical properties of hard alloys VK6, VK8 and T5K10 that have undergone volumetric pulsed laser hardening. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017, vol. 83, no. 3, pp. 37–40.
 10. Zhang F.G., Zhu X.P., Lei M.K. Surface characterization and tribological properties of WC – Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed electron beam. *Vacuum*. 2017, vol. 137, pp. 119–124.
 11. Vereshchaka A.A., Tabakov V.P. Investigation of the influence of multilayer coating architecture on the performance of a carbide tool. *Up-rochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 9 (177), pp. 427–429. (In Russ.).
 12. Tabakov V.P., Khudobin L.B. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of mechanical properties of multilayer coating layers taking into account the functional parameters of the cutting process. *Up-rochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2018, vol. 14, no. 9 (165), pp. 414–418. (In Russ.).
 13. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 2, pp. 105–109.
 14. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Anikin V.N., Belov D.S., Sergevnin B.C. Hardening of a carbide blade tool used for cutting hard-to-process titanium alloys and chromium-nickel steels with multilayer nanostructured coatings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 5, pp. 64–73. (In Russ.).
 15. Oskolkova T.N., Simachev A.S. Investigation of the structure and properties of hard alloy VK10KS after electric spark treatment. *Mi-TOM*. 2022, no. 6 (804), pp. 36–39

Сведения об авторах

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: oskolkova@kuz.ru

Information about the authors

Tatiana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metalworking and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
Email: oskolkova@kuz.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022
 После доработки 15.08.2022
 Принята к публикации 18.08.2022

Received 20.07.2022
 Revised 15.08.2022
 Accepted 18.08.2022