

Научный журнал

ISSN 2304-4497

ВЕСТНИК

СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА



Развиваемся в настоящем,
гордимся прошлым,
создаем будущее!

16+

№ 1, 2023

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 1 (43), 2023

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

Коновалов С.В.
(главный редактор)

Запольская Е.М.
(отв. секретарь)

Агеев Е.В.
Бецофен С.Я.
Бурков В.Н.
Буркова И.В.
Гречников Ф.В.
Громов В.Е.
Данилов В.И.
Деев В.Б.
Jayalakshmi S.
Жеребцов С.В.
Захарова А.А.
Затепякин О.А.
Зеркаль С.М.
Зимин А.В.
Коган А.Б.
Колубаев Е.А.
Копеин В.В.
Нехорошева Л.Н.
Осколкова Т.Н.
Пантелеев В.И.
Петрова Т.В.
Singh R. A.
Рыбенко И.А.
Симченко Н.А.
Siddiquee A.N.
Смагин В.И.
Стрижак П.А.
Султангузин И.А.
Темлянцева М.В.
Хамзаева А.М.
Chen X.
Чехонадских А.В.
Шиплюк А.Н.
Юлдашев Н.Х.
Юрьев А.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Громов В.Е.** Влияние магнитного поля индукцией 0,4 Тл на пластические свойства свинца С2.....3
- Невский С.А., Сарыгчев В.Д., Громов В.Е.** Комбинированные гидродинамические неустойчивости и их роль в образовании микро- и наноструктур материалов при плазменных воздействиях.....10
- Зоря И.В., Полетаев Г.М.** Атомные механизмы миграции границ наклона <100> и <111> на примере никеля.....17
- Gudala S., Konovalov S., Ramesh M.R., Panchenko I.** A Comparative study on nickel-based alloy composite claddings prepared by tungsten inert gas and microwave hybrid heating techniques.....24
- Новиков Е.П., Кругляков О.В., Агеева А.Е.** Размер зерна электрокорунда, спеченного из диспергированных отходов алюминия марки АД0Е.....33

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Бычков А.Г., Киселева, Т.В., Маслова Е.В.** Использование сверточных нейросетей для классификации изображений.....39

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Ганиев И.Н., Аминбекова М.С., Наврузов Х.Р., Эшов Б.Б., Муллоева М.М.** Влияние добавок цинка на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава ССu3.....50
- Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденев Б.Д., Гурьев М.А.** Морфология и фазовый состав диффузионного боридного слоя на основе металлографического анализа стали 45.....59
- Чумаевский А.В., Панфилов А.О., Зыкова А.П., Рубцов В.Е., Княжев Е.О., Осипович К.С., Семенчук В.М., Утяганова В.Р., Никонов С.Ю., Добровольский А.Р., Колубаев Е.А.** Формирование неоднородностей и дефектов в структуре композиционных материалов и функционально-градиентных биметаллических изделий, полученных методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии.....66

Осколкова Т.Н. Исследование структуры и свойств поверхности твердого сплава ВК10КС после двухкомпонентной электро-взрывной обработки с синтетическими алмазами.....	76
Arif M., Malik W., Mir M.A., Ahmad T., Lone N.F., Siddiqueeb A.N. Green welding: exploring the environmental and health benefits of friction stir welding over conventional welding methods.....	83
Ван Я., Коновалов С.В., Чэн С., Панченко И.А., Коток М.М. Исследование влияния термической обработки на сплавы системы Cu – Al, полученные проволоочно-дуговым аддитивным способом	89
Агеев Е.В., Кругляков О.В., Поданов В.О. Пористость жаропрочного сплава, изготовленного искровым плазменным спеканием никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде.....	98

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Наплёкова Т.К., Пигина Т.Н. Практические аспекты повышения эффективности производственной стратегии промышленных предприятий региона.....	104
Перекрест Н.В., Затепякин О.А. Теоретические подходы к определению понятия устойчивого развития горнодобывающего предприятия.....	116
К сведению авторов	126

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.

Адрес редакции:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М
тел. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г
тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г
тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Урал-Пресс» – 41270

Подписано в печать

31.03.2023 г.

Выход в свет

31.03.2023 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 6,8.

Уч.-изд.л. 7,4.

Тираж 300 экз.

Заказ № 57.

Цена свободная

Оригинальная статья

УДК 669.018.25:621.793.184.762.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-76-82

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС ПОСЛЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ АЛМАЗАМИ

© 2023 г. Т. Н. Осколкова

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

Аннотация. Представлены результаты исследований твердого сплава ВК10КС после двухкомпонентного электровзрывного легирования (ЭВЛ) с синтетическими алмазами. В качестве взрывающего проводника был использован алюминий. Выбор алюминия основывается на экспериментальных данных ряда исследователей, которые отмечают, что для увеличения прочностных свойств твердых сплавов при повышенных температурах необходимо, чтобы в кобальтовой связке присутствовали частицы ультрадисперсного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с размером в сотые доли микрона. Добавка алюминия в связку значительно повышает твердость, износостойкость и прочность при изгибе. 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 в глубь материала. Для увеличения эффекта упрочнения в область взрыва дополнительно была внесена порошковая навеска синтетического алмазного порошка АС2 массой 60 мг. Экспериментально выявлено, что легирование поверхности твердого сплава ВК10КС продуктами электровзрыва алюминия с навеской алмазного порошка не привело к образованию упрочненного слоя алмазного типа. В процессе обработки алмазный порошок трансформировался в графит. Несмотря на то, что алмазный слой не образовался, произошло поверхностное упрочнение твердого сплава ВК10КС после электровзрыва алмазного порошка с алюминием в качестве проводника. Толщина упрочненного поверхностного слоя составляет около 15 мкм с нанотвердостью 24000 МПа (в 2 раза выше по сравнению с исходным состоянием). Повышение твердости связано с измельчением фаз в поверхностном слое и формированием карбида типа W_2C и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Шероховатость поверхности обработанных твердосплавных пластин не превышает значений, соответствующих техническим требованиям. Исследованием кобальтовой связующей в зоне термического влияния после двухкомпонентного ЭВЛ установлено, что кобальтовая связующая дополнительно легируется вольфрамом, углеродом, алюминием, входящими в состав взрываемых материалов и основы. Дополнительное легирование кобальтовой связующей приведет к упрочнению, что положительно повлияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твердых сплавов в целом.

Ключевые слова: твердый сплав, структура, электровзрывное легирование, нанотвердость, износостойкость

Для цитирования: Осколкова Т.Н. Исследование структуры и свойств поверхности твердого сплава ВК10КС после двухкомпонентной электровзрывной обработки с синтетическими алмазами // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 76–82. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-76-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-76-82)

Original article

STUDY OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF HARD ALLOY VK10KS AFTER TWO-COMPONENT ELECTRICAL EXPLOSION TREATMENT WITH SYNTHETIC DIAMONDS

© 2023 T. N. Oskolkova

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

Abstract. The article presents the results of studies of the VK10KS hard alloy after two-component electroexplosive treatment (EVL) with synthetic diamonds. Aluminum was used as the exploding conductor. The choice of aluminum is based on the experimental data of a number of researchers who note that in order to increase the strength properties of hard alloys at elevated temperatures, it is necessary that particles with a size of hundredths of a micron of ultrafine $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ be present in the cobalt binder. Thus, the addition of aluminum to the bond significantly increases the hardness, wear resistance and bending strength. The essence of the EVL is the accumulation of energy by a battery of impulse capacitors up to 10 kJ and its subsequent discharge for 100 μs through a conductor that experiences explosive destruction. In this case, the treated surface is heated and saturated with explosion products, followed by self-hardening due to heat removal to the environment and deep into the material. To increase the hardening effect, a powder sample of synthetic diamond powder AC2 weighing 60 mg was additionally added to the explosion area. It was experimentally revealed that alloying the surface of the VK10KS hard alloy with the products of aluminum electric explosion with a sample of diamond powder did not lead to the formation of a hardened diamond-type layer. During processing, the diamond powder transformed into graphite. Despite the fact that the diamond layer was not formed, surface hardening of the VK10KS hard alloy occurred after the electric explosion of diamond powder with aluminum as a conductor. The thickness of the hardened surface layer is about 15 μm with a nanohardness of 24000 MPa, which is 2 times higher compared to the initial state. The increase in hardness is associated with the refinement of phases in the surface layer and the formation of W_2C and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ type carbides. The surface roughness of machined carbide inserts does not exceed the values corresponding to the technical requirements. The study of the cobalt binder in the heat-affected zone after two-component EVL found that the cobalt binder is additionally alloyed with tungsten, carbon, aluminum, which are part of the explosive materials and the base. Additional alloying of the cobalt binder will lead to its hardening, which will positively affect the service life of tungsten carbide hard alloys in general.

Keywords: hard alloy, structure, electroexplosive alloying, nanohardness, wear resistance

For citation: Oskolkova T.N. Study of the structure and properties of the surface of hard alloy vk10ks after two-component electrical explosion treatment with synthetic diamonds. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 1 (43), pp. 76–82. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-76-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-76-82)

Введение

В настоящее время для увеличения срока службы твердых сплавов группы ВК применяют методы упрочнения с использованием концентрированных потоков энергии (метод электровзрывного легирования (ЭВЛ)) [1 – 7]. В работах [8 – 11] рассматриваемый метод ранее был успешно применен для поверхностной обработки твердого сплава ВК10КС с использованием в качестве проводников титана, углерода, алюминия с дополнительными добавками порошков бора и карбида кремния. Этот метод может быть применим для поверхностного упрочнения твердых сплавов на основе карбида вольфрама с добавлением порошка искусственных алмазов.

На основе анализа работ [12 – 15] установлена возможность формирования алмазных покрытий на неперетачиваемых твердосплавных пластинах, применяемых при механической обработке. Целью настоящей работы является попытка получения поверхностного слоя алмазного типа на твердом сплаве ВК10КС способом электровзрывного легирования и исследование особенностей его структурного состояния и свойств.

Материалы, способ обработки и методы исследования

Поверхностному упрочнению способом электровзрывного легирования подвергался твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Свердловская обл.).

Суть этого метода заключается в накоплении энергии батареями импульсных конденсаторов до 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. Нагревается обрабатываемая поверхность образца и происходит насыщение ее продуктами взрыва. Параллельно с этим протекает самозакалка из-за отвода тепла в окружающую среду и в глубь материала. Поверхность твердого сплава ВК10КС обрабатывали при интенсивности воздействия 6,0 ГВт/м² и зарядном напряжении $U = 2,3$ кВ. Оплавление поверхности и интенсивное конвективное перемешивание расплава обеспечиваются воздействием плазменной струи с неоднородным давлением на поверхность.

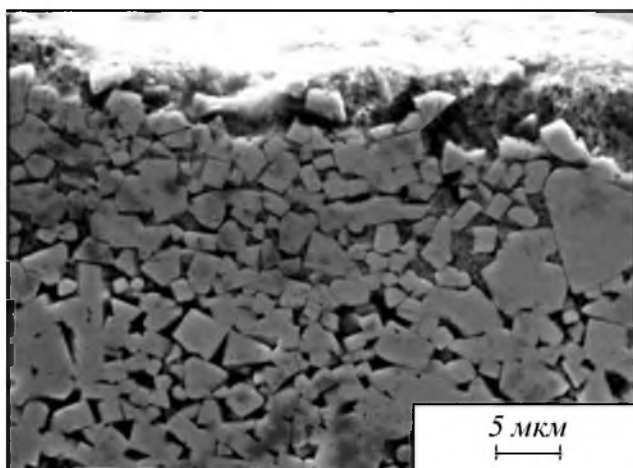


Рис. 1. Микроструктура сплава ВК10КС после электровзрыва синтетического алмаза с алюминиевым проводником

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after electric explosion of synthetic diamond with aluminum conductor

Функцию взрываемого проводника выполнял алюминий (алюминиевая фольга толщиной 20 мкм, диаметром 50 мм и массой 40 мг из расчета на 15 см² обрабатываемой поверхности). В работе [16] считают, что небольшое количество в кобальтовой связке частиц размером в сотые доли мкм ультрадисперсного α -Al₂O₃ приведет к увеличению прочностных свойств (твердости, износостойкости и прочности при изгибе).

Для увеличения эффекта упрочнения поверхности твердого сплава ВК10КС при использовании алюминиевого взрываемого проводника дополнительно в виде порошка был внесен синтетический алмаз АС2 массой 60 мг.

Изучение микроструктуры после ЭВЛ алюминия с алмазным порошком проводили с использованием микроскопа Philips SEM 515, сканирующего электронного микроскопа EVO 50 XVP, рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0 с железным K α -излучением. Свойства упрочненной зоны определяли методами оценки

нанотвердости на приборе Nano Hardness Tester, износостойкости с помощью высокотемпературного трибометра PC-Operated High Temperature Tribometer, шероховатости – на установке Micro Measure 3D station фирмы CSEM).

Результаты исследования

Металлографические исследования образцов после электровзрывной обработки алюминия с порошком синтетического алмаза выявили формирование на облучаемой поверхности тонкого, плохо травящегося слоя толщиной 1 мкм, глубже которого располагается слой толщиной 12 мкм с измельченными карбидами. Рассматриваемый слой плавно переходит в основу сплава (рис. 1). В поверхностном слое и в основе после ЭВЛ трещин не выявлено.

Рентгенографические исследования обработанного сплава (рис. 2) выявили наличие оксида α -Al₂O₃, карбида вольфрама W₂C. В слое также присутствуют карбид вольфрама WC и небольшое количество углерода в виде графита.

Механизм формирования поверхностного слоя после электровзрыва алюминиевой фольги с добавками порошка синтетических алмазов состоит в следующем: на облучаемой поверхности формируется очень тонкое покрытие (примерно 1 мкм), образованное конденсированными частицами алюминия (продукт взрыва). Алюминий из-за большого сродства с кислородом соединяется с ним и образует мелкодисперсные частицы α -Al₂O₃. Это подтверждается результатами растровой электронной микроскопии и рентгенографическими исследованиями (рис. 2, 3). Под слоем α -Al₂O₃ располагался слой из карбидов вольфрама W₂C и WC. Частицы этих карбидов в процессе кристаллизации после ЭВЛ уменьшались в размерах до 2 – 3 мкм по сравнению с исходными 5 – 7 мкм. Исходя из

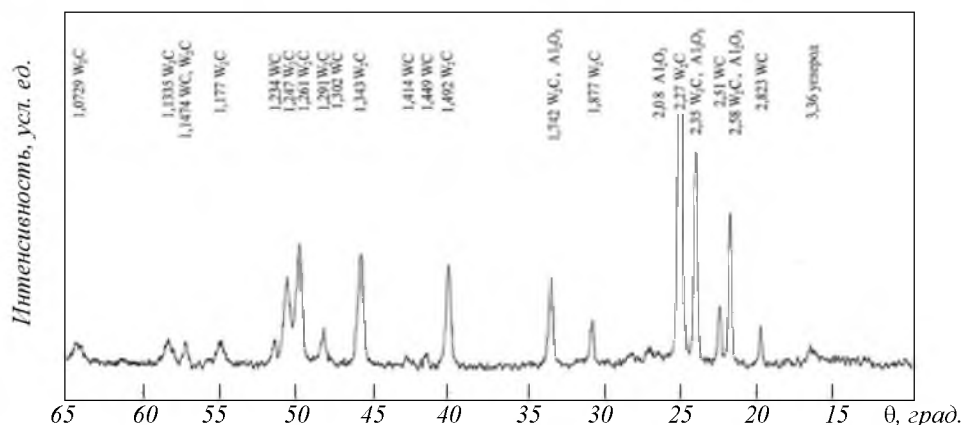


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы сплава ВК10КС после обработки электровзрывом алюминия с алмазным порошком

Fig. 2. Fragments of diffraction patterns of the VK10KS alloy after processing by electric explosion of aluminum with diamond powder

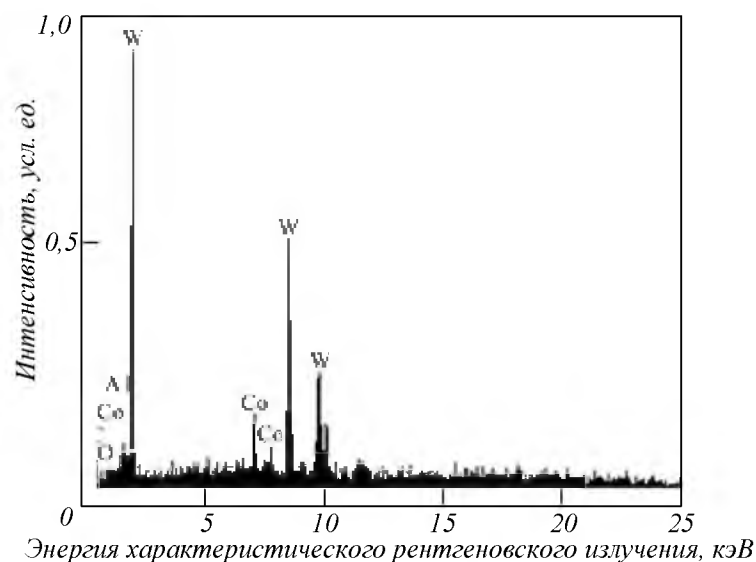


Рис. 3. Элементный состав поверхностного слоя сплава ВК10КС после электровзрыва алюминия с порошком синтетического алмаза

Fig. 3. The elemental composition of the surface layer of the VK10KS alloy after the electric explosion of aluminum with synthetic diamond powder

диаграммы состояния системы W – C [17], при электровзрывной обработке концентрация углерода становилась меньше 50 % из-за легирования расплава алюминия в местах расположения частиц карбида вольфрама и нарушения стехиометрического соотношения, поэтому фазовый состав определялся смесью WC + W₂C.

После поверхностной обработки следует отметить изменение химического состава кобальтовой связующей в приповерхностном слое. Результаты растровой электронной микроскопии представлены на рис. 4. Изучение химического состава кобальтовой связующей на расстоянии 3 – 5 мкм от поверхности после электровзрыва алюминиевой фольги с

алмазным порошком показало легирование ее алюминием (0,137 %) и вольфрамом (34,16 %).

На поверхности твердого сплава ВК10КС алмазного покрытия не обнаружено. Синтетические алмазы марки АС2 имеют большую склонность к графитизации под действием высоких температур и относительно длительной выдержке (более 15 мин), чем естественные алмазы [18]. Электровзрывное легирование алюминия с алмазным порошком проводили за короткое время (10^{-4} с), поэтому теоретически можно было предполагать возможность получения алмазоподобного покрытия за счет конденсированной составляющей. Присутствие кобальта в твердом сплаве ускоряет процесс графитизации [18].

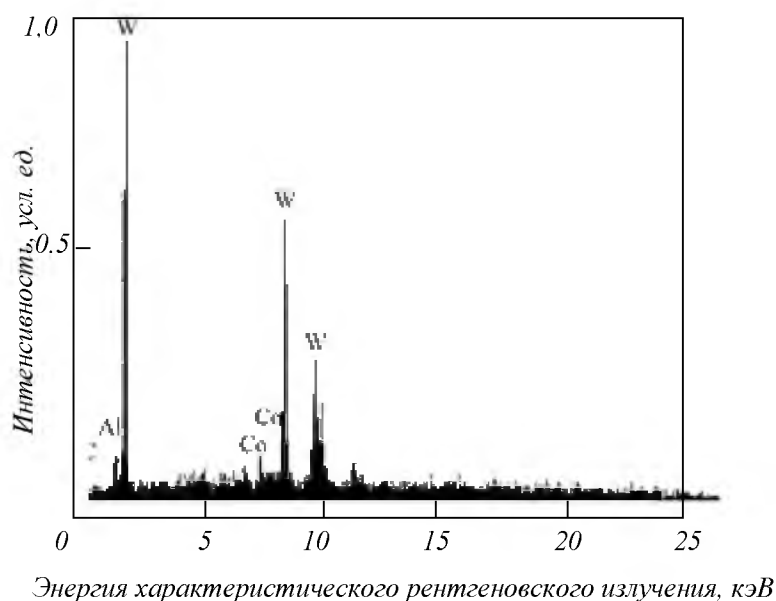


Рис. 4. Элементный состав кобальтовой связующей сплава ВК10КС после обработки электровзрывом алюминия с алмазным порошком

Fig. 4. Elemental composition of the cobalt binder alloy VK10KS after treatment with electric explosion of aluminum with diamond powder

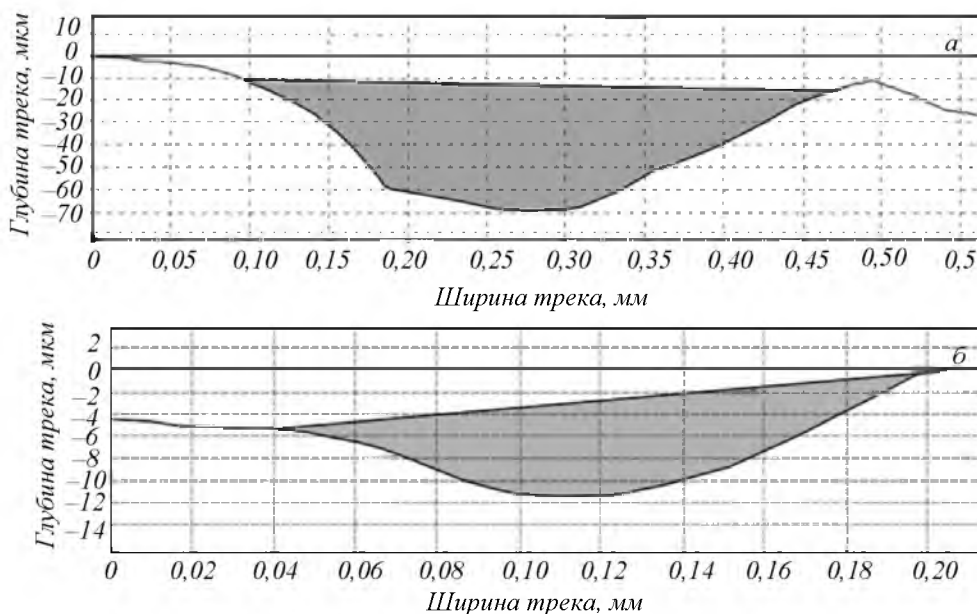


Рис. 5. Профиль и площадь (выделена цветом) трека износа исходного образца (а) и образца после обработки электровзрывом алмазного порошка с алюминием (б)

Fig. 5. Profile and area (highlighted in color) of the wear track of the initial samples (a) and the sample after electroexplosion treatment of diamond powder with aluminum (b)

На поверхности твердого сплава в результате обработки отсутствует покрытие алмазоподобного типа, так как в рассматриваемом случае синтетический алмаз проявил склонность к процессу графитизации (рис. 2).

Профилометрические исследования показали, что ЭВЛ алюминиевой фольгой с алмазным порошком приводит к незначительному увеличению шероховатости поверхности до $Ra = 1,84$ мкм по сравнению с исходным состоянием ($Ra = 1,32$ мкм), но сохраняя ее в пределах технических требований (допустимая чистота обработки твердого сплава 2,50 мкм). Повышение шероховатости после обработки происходит в связи с осаждением конденсированных частиц продуктов взрыва, которые располагаются в тылу струи и попадают на поверхность твердого сплава уже в процессе ее кристаллизации, формируя новый рельеф [19].

Наноиндентирование показало увеличение твердости обработанной поверхности сплава ВК10КС до 24000 МПа, что превосходит нанотвердость образцов в исходном состоянии в два раза.

Износ определялся на десяти образцах при измерении глубины и площади трека до и после обработки. Трек образуется в результате вращения алмазного индентора по неподвижному образцу. Испытания на износ проводили при нагрузке на образец 3 Н, количестве оборотов 4000, линейной скорости движения 2,5 см/с. Аналогичные испытания проводили на исходных образцах.

Трибологические испытания выявили глубину трека износа исходного образца 58,0 мкм, а после обработки – 8,62 мкм (рис. 5). Площадь трека износа исходного образца составляет 12921 мкм², после упрочнения – 816 мкм². Коэффициент трения μ об-

разцов после ЭВЛ алмазным порошком с использованием алюминия в качестве проводника и исходного образца составляет 0,20 и 0,41.

Увеличение износостойкости упрочненных образцов связано с образованием на поверхности α -Al₂O₃, карбидов W₂C, которые имеют большую твердость, чем WC [20]. Вместе с тем ожидаемого упрочнения поверхности твердого сплава ВК10КС не достигнуто, так как алмазоподобное покрытие способом ЭВЛ сформировать не представляется возможным из-за трансформации порошка искусственных алмазов в графит.

Выводы

Экспериментально выявлено, что легирование поверхности твердого сплава ВК10КС продуктами электровзрыва алюминия с порошком синтетического алмаза не привело к образованию упрочненного слоя алмазного типа. В процессе обработки алмазный порошок трансформировался в графит. Несмотря на то, что алмазный слой не образовался, произошло поверхностное упрочнение твердого сплава ВК10КС после ЭВЛ. Толщина упрочненного поверхностного слоя составляет около 15 мкм с нанотвердостью 24000 МПа (в два раза выше по сравнению с исходным состоянием). Повышение твердости связано с измельчением фаз в поверхностном слое и формированием карбида типа W₂C и α -Al₂O₃. Шероховатость поверхности обработанных твердосплавных пластин не превышает значений, соответствующих техническим требованиям. Исследованием кобальтовой связующей в зоне термического влияния после ЭВЛ алюминием с порошком синтетического алмаза установлено, что кобальтовая связующая дополнительно легируется

вольфрамом, углеродом, алюминием, входящими в состав взрывааемых материалов и основы. Дополнительное легирование кобальтовой связующей приведет к упрочнению поверхности, что положительно повлияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твердых сплавов в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 2. P. 105–109.
2. 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.
3. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава Т15К6 // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018. № 2. С. 76–84.
4. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брачихин 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.
5. 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.
6. 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.
7. Козаков А.Т., Яресько С.И., Сидашов А.В. Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов. Ростов-на-Дону: изд. Ростовского государственного университета путей сообщений, 2015. 378 с.
8. Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of carbide tools based on tungsten carbide by concentrated energy flows // *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No. 12. P. 853–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>
9. Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Яресько 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. 922–928. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-922-928>
10. Oskolkova T.N., Simachev A.S. Influence of pulse-plasma modification of vk10ks solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties // *Steel in Translation*. 2020. Vol. 63. No. 5. P. 351–356. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-351-356>
11. 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.
12. Пат. 2138396 РФ. Подложка с алмазным покрытием / Кулландер Грегор, Рейнер Ингрид, Брэндруп-Уогнсен Хелен; Сандвик А.Б.; заявл. 08.07.1994; опубл. 27.09.1999.
13. Пат. 96114978 РФ. Инструмент с алмазным покрытием и способ его изготовления / Джордж П. Грэб, Вильям М. Мелэго, Эдвард Дж. Олес и др.; заявл. 30.06.1996; опубл. 10.09.1998.
14. Пат. 2167262 РФ. Наплавка твердым сплавом с покрытыми алмазными частицами (варианты), присадочный прутки для наплавки твердым сплавом, способ наплавки твердым сплавом (варианты), коническое шарошечное долото для вращательного бурения (варианты), коническая шарошка / Ленгфорд Джеймс В. Мл., Дельвиче Роберт; заявл. 29.07.1996; опубл. 20.05.2001.
15. Пат. 6358624 США. Инструмент из поликристаллического алмаза / Yoshida Katsuhito, Shiraishi Junichi, Nakai Tetsuo Sumitomo; заявл. 16.05.2000; опубл. 19.03.2002.
16. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. Москва: МИСиС. 2004. 464 с.
17. Чапорова И.Н., Чернявский К.С. Структура спеченных твердых сплавов. Москва: Металлургия. 1975. 248 с.
18. Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые материалы. Москва: Металлургия. 1990. 327 с.
19. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов и др. Новокузнецк: изд. СибГИУ. 2007. 301 с.
20. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Москва: Металлургия, 1976. 560 с.

REFERENCES

1. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 2, pp. 105–109.

2. 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.
3. 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.).
4. Pinakhin I.A., Chernigovsky V.A., Bratsikhin A.A., Yagmurov M.A., Sugarov H.R. Investigation of physical and mechanical properties of hard alloys VK6, VK8 and T5K10 subjected to volumetric pulsed laser hardening. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017, vol. 83, no. 3, pp. 37–40. (In Russ.).
5. Vereshchaka A.A., Tabakov V.P. Investigation of the influence of the architecture of a multilayer coating on the performance of a carbide tool. *Strengthening technologies and coatings*. 2019, vol. 15, no. 9, pp. 427–429. (In Russ.).
6. Tabakov V.P., Khudobin L.B. Improving the performance of the carbide tool by directional selection of the mechanical properties of the multilayer coating layers, taking into account the functional parameters of the cutting process. *Hardening technologies and coatings*. 2018, vol. 14, no 9 (165), pp. 414–418.
7. Kozakov A.T., Yaresko S.I., Sidashov A.V. *Modification and analysis of the surface of steels and alloys*. Rostov-on-Don: Rostov State University of Railway Transport, 2015, 378 p. (In Russ.).
8. Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of carbide tools based on tungsten carbide by concentrated energy flows. *Steel in Translation*. 2021, vol. 51, no. 12, pp. 853–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>.
9. Oskolkova T.N., Simachev A.S., Yares'ko S.I. Influence of pulse-plasma modification with titanium and silicon carbide of the surface of hard VK10KS alloy on its structure and properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 922–928. (In Russ.).
10. Oskolkova, T.N., Simachev, A.S. Influence of pulse-plasma modification of vk10ks solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties. *Steel in Translation*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 351–356. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-351-356>
11. 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.
12. Kullander Gregor, Rayner Ingrid, Brandrup-Wognsen Helen; Sandwick A.B. *Diamond coated substrate*. Pat. 2138396; application 08.07.1994; publ. 27.09.1999. (In Russ.).
13. George P. Grab, William M. Melego, Edward J. Oles et al. *Diamond-coated tool and method of its manufacture*. Pat. 96114978; application 30.06.1996; publ. 10.09.1998. (In Russ.).
14. Langford James W. Jr., Delviche Robert. *Hard alloy surfacing with coated diamond particles (options), filler rod for hard alloy surfacing, hard alloy surfacing method (options), conical ball drill bit for rotary drilling (options), conical ball*. Pat. 2167262; application 29.07.1996; publ. 20.05.2001. (In Russ.).
15. Yoshida Katsuhito, Shiraishi Junichi, Nakai Tetsuo Sumitomo. *Polycrystalline diamond tool*. Pat. 6358624 US; application 16.05.2000; publ. 19.03.2002.
16. Panov V.S., Chuvilin A.M., Falkovsky V.A. *Technology and properties of sintered hard alloys and products from them*. Moscow: Mrs. 2004, 464 p. (In Russ.).
17. Chaporova I.N., Chernyavsky K.S. *Structure of sintered hard alloys*. Moscow: Metallurgy, 1975, 248 p. (In Russ.).
18. Polyakov V.P., Nozhkina A.V., Chirikov N.V. *Diamonds and superhard materials*. Moscow: Metallurgy. 1990, 327 p. (In Russ.).
19. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F. et al. *Physical bases of electro-explosive alloying of metals and alloys*. Novokuznetsk: SibGIU Publishing House. 2007, 301 p. (In Russ.).
20. Samsonov G.V., Vinnitskiy I.M. *Refractory compounds*. Moscow: Metallurgy, 1976, 560 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

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

Information about the authors

Tatyana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Metalforming and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
E-mail: oskolkova@kuz.ru

Поступила в редакцию 17.10.2022
После доработки 20.10.2022
Принята к публикации 24.10.2022

Received 17.10.2022
Revised 20.10.2022
Accepted 24.10.2022