

УДК 621.793.74:669.018.25:669.295+661.665

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ТИТАНОМ И КАРБИДОМ КРЕМНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС НА ЕГО СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА****Осколкова Т.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (oskolkova@kuz.ru)**Симачев А.С.¹, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (simachev_as@mail.ru)**Ярьеско С.И.², д.т.н., ученый секретарь (yaresko@fan.smr.ru)*¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН)
(443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221)

Аннотация. Описан способ импульсной плазменной обработки – электровзрывное легирование, заключающееся в накоплении энергии батарей импульсных конденсаторов и последующем разряде в течение 100 мкс через проводник в виде титановой фольги с порошком карбида кремния, при этом проводник испытывал взрывное разрушение. Способ электровзрывного легирования вольфрамкобальтового твердого сплава включает расплавление поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой путем отвода тепла в глубину материала и окружающую среду. На поверхности твердого сплава ВК10КС получено покрытие толщиной до 15–20 мкм с нанотвердостью 26 000 МПа. С помощью рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии установлено, что в поверхностном слое формируются новые фазы TiC, W₂C, (W, Ti)C_{1-x}, WSi₂ с высокими твердостями. В результате этого коэффициент трения снизился до 0,18 по сравнению с исходным 0,41. Исследованиями с помощью просвечивающей электронной микроскопии выявлены изменения при электровзрывном легировании, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах. В карбидной фазе обнаружены скопления дислокаций. В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама. Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта. Дополнительное легирование кобальтовой связующей в зоне термического влияния после импульсной плазменной обработки положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамкобальтовых твердых сплавов в целом из-за своей стабилизации.

Ключевые слова: импульсная плазменная обработка, вольфрамкобальтовые твердые сплавы, нанотвердость, износостойкость, взрываемый проводник, микроструктура, электровзрывное легирование, поверхностное упрочнение, шероховатость, кобальтовая связующая.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-922-928

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы WC–Co – наиболее прочные из известных спеченных твердых сплавов, широко используются в качестве инструментальных материалов в машиностроении, горнодобывающей и деревообрабатывающей промышленности в нашей стране. В общей массе эксплуатируемого инструмента износ и поломки твердосплавных элементов составляют 80–90 %, поэтому одним из перспективных направлений повышения износостойкости твердого сплава при сохранении вязкости является поверхностное упрочнение.

На основании анализа специальной технической литературы установлено, что упрочняющие обработки являются эффективным средством повышения рабо-

тоспособности инструмента различного назначения. В нашей стране и за рубежом чаще используют одно- и многокомпонентные однослойные и многослойные покрытия, наносимые различными способами. Такие покрытия состоят из нитридов титана, циркония, ниобия, оксида алюминия [1–10], толщина покрытий колеблется в пределах от 3 до 20 мкм.

В настоящее время с целью повышения долговечности твердосплавных изделий помимо покрытий используются поверхностные методы упрочнения с применением различных источников внешних высокоэнергетических воздействий [11–21], механизмы которых являются недостаточно изученными. Именно поэтому поиск новых технических решений, ориентированных на импульсно-плазменное модифицирование поверхности твердых сплавов группы ВК, является актуальным. Формирование износостойких поверхностных слоев вольфрамкобальтовых твердых сплавов

* Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля Е.А. Будовских за предоставленную возможность в проведении эксперимента.

будет способствовать повышению эксплуатационных характеристик различного инструмента, производительности труда, экономии дефицитного сырья (вольфрама и кобальта).

Целью настоящих исследований явилось получение упрочненного слоя на поверхности сплава ВК10КС способом электровзрывного легирования (ЭВЛ) с использованием титана и карбида кремния, исследование его структуры и свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Способ ЭВЛ заключается в формировании структуры и изменении свойств металлов и сплавов при импульсном воздействии на поверхность многофазной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва проводников. Сущность работы электровзрывной установки состоит в накоплении энергии батарей импульсных конденсаторов до величины 10 кДж, последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. Способ ЭВЛ включает нагрев поверхности вольфрамокобальтового твердосплавного инструмента и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой путем отвода тепла в глубь материала и окружающую среду. Источником теплового воздействия и легирующих элементов при ЭВЛ на поверхность является импульсная многофазная плазменная струя, сформированная из материала взрываемого проводника. Продукты взрыва истекают в вакуумную технологическую камеру установки с остаточным давлением 100 Па.

В работе для электровзрывной обработки использовали твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Россия).

Обработку поверхности твердого сплава проводили в высокоэнергетическом режиме при интенсивности воздействия $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ и зарядном напряжении $U = 2,3 \text{ кВ}$. Облучаемая поверхность твердого сплава ВК10КС испытывала оплавление и интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность.

В настоящей работе в качестве взрываемого проводника применяли титан ВТ1-00 в виде титановой фольги толщиной 25 мкм. При взрыве титана можно ожидать формирования на поверхности твердых сплавов группы ВК карбидов титана TiC – основу твердых сплавов группы ТК, используемых при высоких скоростях резания. В работе [22] установлено, что ЭВЛ сплава ВК10КС титаном позволяет повысить поверхностную твердость до 25 000 МПа.

Усилить процесс упрочнения при ЭВЛ возможно за счет совместного взрыва проводника (титана) и размещаемого в область взрыва порошка карбида кремния SiC фракцией 3 мкм из расчета 60 мг на 15 см^2 .

Карбид кремния выбран по следующим причинам: спеченные твердые сплавы являются гетерофазным материалом с высокоразвитой межфазной и контактной поверхностью, которые оказывают существенное влияние на их свойства. Установлено [23], что микротрещины зарождаются преимущественно на контактных карбидных WC/WC и межфазных WC/Co поверхностях. В кобальтовой связке микротрещины, как правило, гасятся. После достижения микротрещиной критического размера развивается магистральная трещина, в процессе образования которой освобождается большое количество упругой энергии. Магистральная трещина проходит через все элементы структуры спеченного твердого сплава. Исследованиями [24] установлена последовательность слабых звеньев при прохождении магистральной трещины: WC/WC, WC, WC/Co, Co. Из анализа следует, что увеличение адгезии фаз в спеченных твердых сплавах будет тормозить рост усталостных трещин. Увеличить адгезию контактных и межфазных поверхностей можно введением в спеченные твердые сплавы адгезионно-активных элементов. В системе W–C–Co таким элементом является кремний [25]. Легирование кремнием кобальтовой фазы по мнению авторов работы [23] способствует упрочнению межфазных границ и тормозит рост трещин. Это позволяет предположить, что ЭВЛ проводников с дополнительной навеской карбида кремния приведет к дополнительному легированию кобальтовой связующей поверхностного упрочненного слоя кремнием и, тем самым, продлит эксплуатационный срок изделий.

Исследование структуры твердого сплава после электровзрывной обработки осуществляли с помощью растровых микроскопов «Philips SEM 515», «Philips XL-30» и просвечивающего электронного микроскопа марки Tescan 20 G2 TWIN фирмы FEI (Нидерланды) с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Рентгенографические исследования проводили с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 в Fe K_α -излучении.

Оценку нанотвердости поверхностного слоя после упрочнения проводили на приборе «Nano Hardness Tester» фирмы CSEM. Результаты измерения нанотвердости представлены как среднеарифметические значения, полученные от 10 испытаний на трех образцах после обработки с помощью компьютерной программы Mountains Map Universal, версия 2.0.13.

Трибологические испытания образцов в спеченном состоянии и после многокомпонентной электровзрывной обработки проводили с помощью высокотемпературного трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов определяли путем измерения с помощью высокоточной измерительной установки «Micro Measure 3D station» с программным обеспечением глубины и площади трека износа после испытаний. Трек образуется в результате действия неподвижного алмазного инден-

тора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, числе оборотов 4000, линейной скорости движения 2,5 см/с. 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.

Профилометрические исследования проводили на установке «Micro Measure 3D station» фирмы CSEM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сканирующая электронная микроскопия твердосплавных пластин после обработки электровзрывом титана с карбидом кремния показала образование поверхностного слоя толщиной 15 – 20 мкм (рис. 1). Химический состав поверхностного слоя: 25,2 % Ti; 64,0 % W; 8,7 % C; 2,1 Si %. В слое наблюдается уменьшение частиц карбидов и плавный переход в основу твердого сплава без образования микротрещин на границе зоны поверхностного легирования и основы. Измельчение частиц карбидов вольфрама происходит до 1 – 3 мкм, в то время как исходные размеры частиц карбидов составляют 3 – 7 мкм.

По данным рентгенографических исследований в поверхностном слое после ЭВЛ и процесса кристаллизации происходит изменение фазового состава (рис. 2), которое связано с формированием мелкодисперсных фаз, состоящих из карбидов TiC (30 %), W₂C (30 %), WC (25 %), (W, Ti)C_{1-x} (6 %). Образование карбида вольфрама W₂C происходит из-за недостатка углерода (в связи с кристаллизацией TiC) вследствие нарушения стехиометрического равновесия между вольфрамом и углеродом. Помимо имеющихся фаз в поверхностном слое идентифицирован силицид вольфрама WSi₂ (9 %).

Изучение химического состава кобальтовой связующей на расстоянии 3 – 5 мкм от поверхности после электровзрыва титана с карбидом кремния показало,

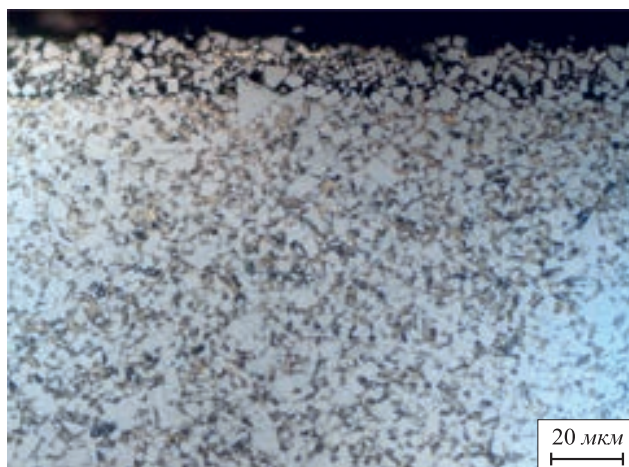


Рис. 1. Микроструктура сплава VK10КС после электровзрывного легирования титаном совместно с карбидом кремния

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after electro-explosive alloying with titanium and silicon carbide

что данная фаза представляет собой пересыщенный твердый раствор, дополнительно легированный вольфрамом, углеродом, титаном и кремнием.

По данным растровой электронной микроскопии ЭВЛ титаном совместно с карбидом кремния привело к дополнительному легированию кобальтовой связующей упрочненного слоя кремнием в количестве 0,97 %, титаном – 0,12 %. Отмеченное повышение в кобальтовой связующей легирующих элементов по сравнению с исходным спеченным состоянием (рис. 3) обусловлено оплавлением как кобальта, так и частиц карбида вольфрама WC, карбида кремния SiC, титана, конвективным перемешиванием расплава и последующим интенсивным охлаждением.

Концентрация веществ созданного с помощью ЭВЛ титановой фольгой с добавлением порошка из карбида кремния покрытия на твердом сплаве VK10КС уменьшается от поверхности в глубь твердосплавной пластины. Образовавшаяся между основой и покрытием связь

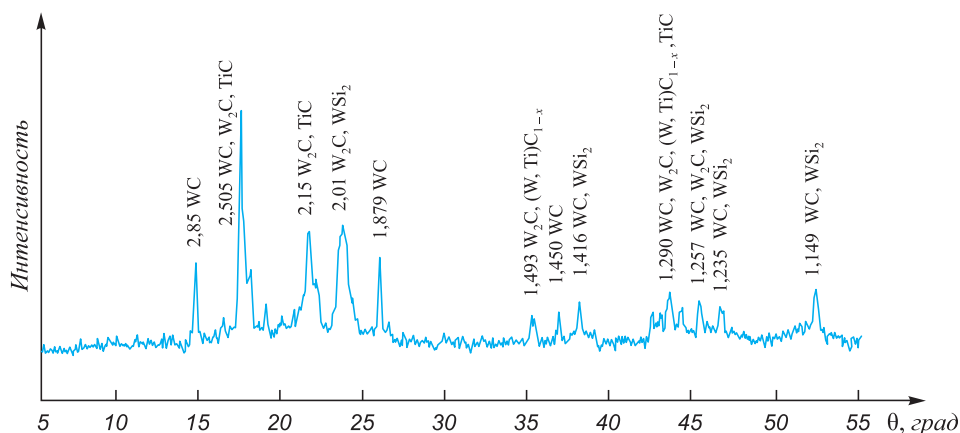


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы поверхности сплава VK10КС после электровзрывного легирования титаном с карбидом кремния

Fig. 2. Fragment of diffraction pattern of the surface of VK10KS alloy after electro-explosive alloying with titanium and silicon carbide

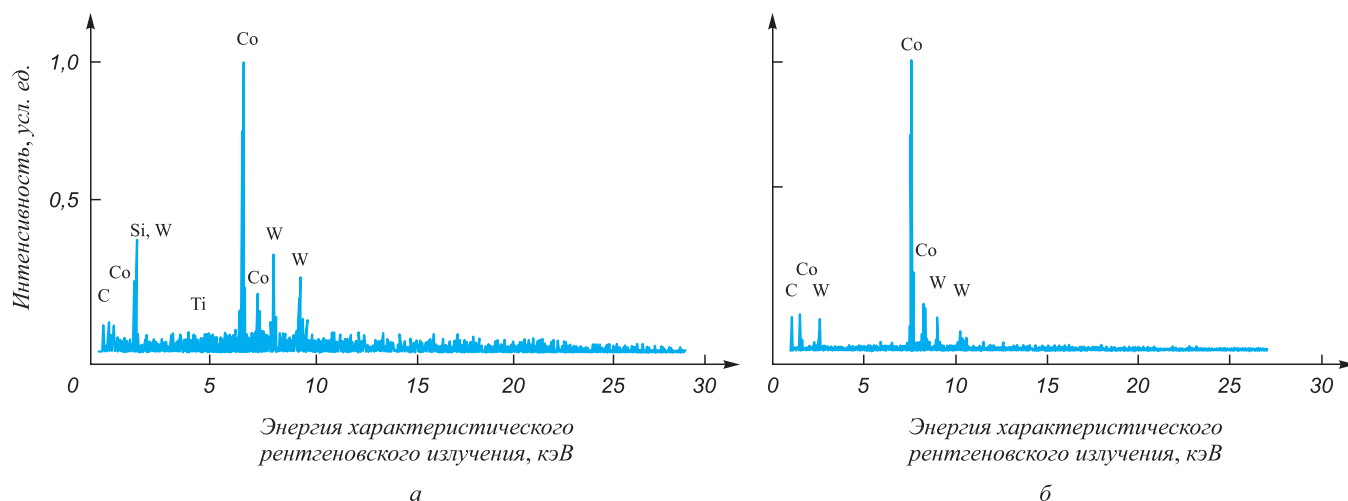


Рис. 3. Элементный состав кобальтовой связующей сплава VK10КС в упрочненном слое после электровзрывного легирования титаном с карбидом кремния (а) и в спеченном исходном состоянии (б)

Fig. 3. Elemental composition of cobalt binder of VK10KS alloy in the hardened layer after electro-explosive alloying with titanium and silicon carbide (a) and in the sintered initial state (b)

должна сохранять свою устойчивость в течение длительной эксплуатации при повышенных температурах, не «рассасываясь» диффузионно или вследствие ряда последовательных химических реакций. В этом отношении присутствие кремния играет позитивную роль.

Просвечивающей электронной микроскопией выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе обнаружены как единичные дислокации, так и ячеистая дислокационная структура (рис. 3, а), что приводит к наклепу зерен карбида вольфрама WC.

В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, а также мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама (рис. 3, б). Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта [20].

Известно, что с повышением содержания легирующих элементов в кобальтовой связке растет ее твердость, а также увеличивается предел прочности при растяжении и предел текучести. Все это способствует получению твердого сплава с необходимой прочностью и позволяет, например, увеличивать силу удара при бурении, штамповке. Кроме того, авторами работ [23, 24] установлено, что при эксплуатации усталостная трещина проходит через все элементы структуры спеченного твердого сплава. Легирование кремнием кобальтовой фазы, по мнению А.Ф. Лисовского [25], способствует упрочнению межфазных границ и тормозит рост усталостных трещин. Помимо дополнительного легирования кобальтовой связующей элементами взрывае-

материалов с помощью электронной микроскопии в твердом сплаве на расстоянии 10 мкм от поверхности в кобальтовой связующей выявлены деформационные линии и дислокации (рис. 4, б).

Нанотвердость поверхности после обработки электровзрывом титановой фольги с карбидом кремния увеличивается до 26 000 МПа.

Изучение микрогеометрии поверхности выявило, что многокомпонентное ЭВЛ приводит к незначительному увеличению шероховатости поверхности, сохраняя ее в пределах технических требований ($Ra = 2,50$ мкм). Параметр шероховатости Ra поверхности исходного образца составляет 1,32 мкм. При электровзрывной обработке титаном с порошком из карбида кремния шероховатость составляет 2,16 мкм.

Увеличение шероховатости поверхности происходит вследствие того, что частицы карбида кремния не только полностью проникают в глубь расплава, но и осаждаются на саму поверхность, на которой формируется покрытие из конденсированных частиц продуктов взрыва и карбида кремния. При конденсации на поверхности продуктов взрыва из тыла струи отдельные капли деформируются и растекаются на ней, формируя новый рельеф.

Трибологические испытания образцов после электрического взрыва титановой фольги с карбидом кремния показали, что глубина трека износа исходного образца VK10КС составляет 58 мкм, а после ЭВЛ титановой фольги с порошком из карбида кремния – 4,11 мкм (рис. 5). Площадь трека износа исходного образца составляет 12 921 мкм², а после ЭВЛ титановой фольгой с карбидом кремния – 373 мкм² (рис. 5).

Коэффициент трения (μ) образцов, обработанных ЭВЛ карбидом кремния с использованием титановой фольги, составляет 0,185, исходных образцов – 0,41.

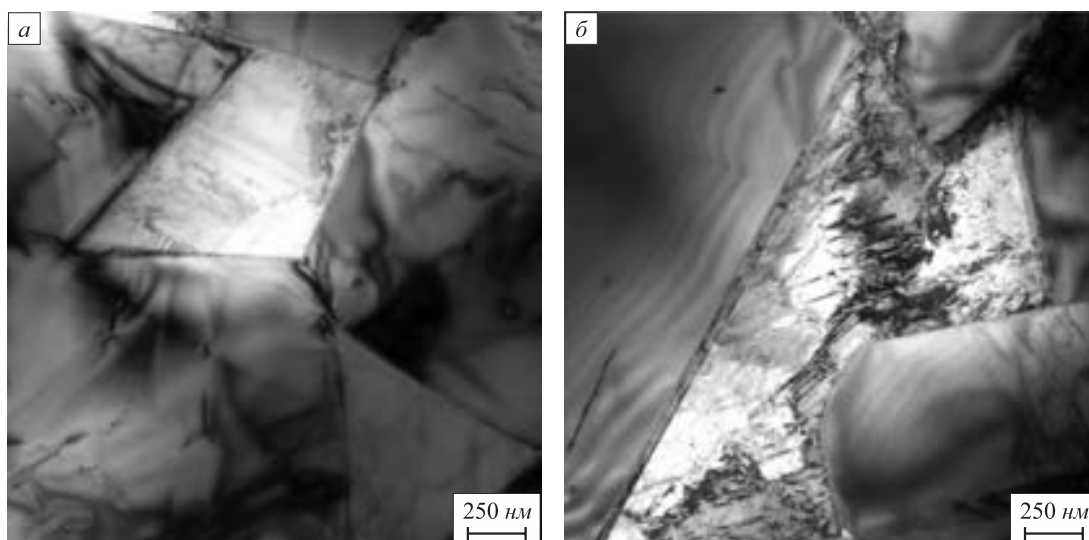


Рис. 4. Структура сплава ВК10КС после электровзрывной обработки титаном с карбидом кремния: *a* – поверхностный слой; *б* – на расстоянии 10 мкм от поверхности

Fig. 4. Structure of VK10KS alloy after electro-explosive treatment with titanium and silicon carbide: *a* – surface layer; *b* – at a distance of 10 microns from the surface

Очевидно, что небольшой износ упрочненной поверхности связан с образованием на поверхности твердого сплава ВК10КС карбидов типа TiC , W_2C , а также силицида вольфрама WSi_2 с большей твердостью, чем у карбида вольфрама WC .

Выводы

В результате обработки на поверхности твердого

сплава ВК10КС формируются новые мелкодисперсные высокотвердые фазы (TiC , W_2C , WSi_2), которые состоят из элементов основного материала и взрывааемых проводников, обладают высокой энергией связи решетки, высокой температурой плавления и твердостью. Обработанные образцы обладают повышенной износостойкостью по сравнению с исходным состоянием, коэффициенты трения упрочненных поверхностей составляют 0,185, исходной поверхности – 0,41.

Исследованием кобальтовой связующей в зоне термического влияния после многокомпонентного ЭВЛ выявлено, что она дополнительно легируется вольфрамом, углеродом, титаном, кремнием, входящими в состав взрывааемых материалов и основного материала. Дополнительное легирование кобальтовой связующей положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамокобальтовых твердых сплавов в целом из-за ее стабилизации. Просвечивающей электронной микроскопией выявлены изменения, возникающие в кобальтовой фазе при электровзрывном легировании титаном с карбидом кремния. Помимо дополнительного легирования кобальтовой связующей выявлены деформационные линии скольжения, дислокации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Табаков В.П., Чихранов А.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора рациональных параметров состава износостойкого покрытия // СТИН. 2016. № 3. С. 14 – 18.
2. Oskolkova T.N. Wear resistant coating on tungsten carbide hard alloy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. Article 012020.
3. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear-resistant coatings // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 2. P. 105 – 109.

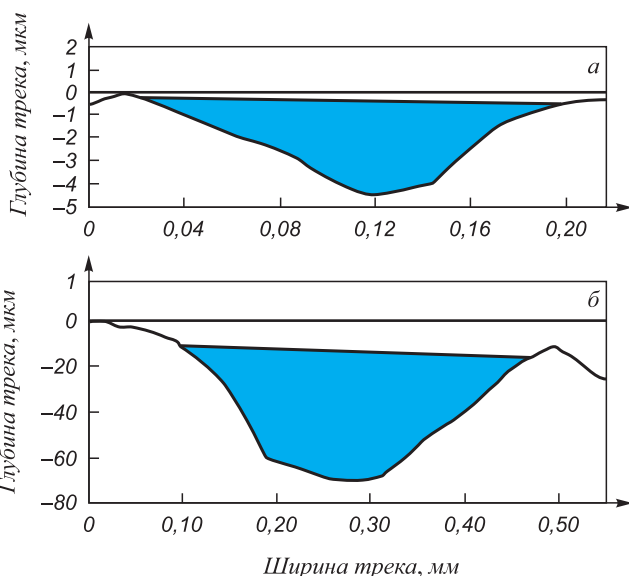


Рис. 5. Профиль и площадь (выделена цветом) трека износа образцов после электровзрывного легирования титаном с карбидом кремния SiC (*a*) и в спеченном состоянии (*б*)

Fig. 5. Profile and area (highlighted in color) of the samples wear track after electro-explosive alloying with titanium and silicon carbide (*a*) and in the sintered state (*b*)

4. Осколкова Т.Н., Глезер А.М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 47. № 12. С. 980 – 991.
5. 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.
6. 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.
7. Волхонский А.О., Блинков И.В., Аникин В.Н., Белов Д.С., Сергеевич В.С. Упрочнение твердосплавного лезвийного инструмента, используемого для резания труднообрабатываемых титановых сплавов и хромоникелевых сталей, многослойными наноструктурными покрытиями // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2015. № 5. С. 64 – 73.
8. Yuan J.H., Ma C.W., Yang S.L., Yu Z.S., Li H. Improving the wear resistance of HVOF sprayed WC–Co coatings by adding submicron-sized WC particles at the splats' interfaces // Surface & Coatings Technology. 2016. Vol. 285. P. 17 – 23.
9. Аникин В.Н., Пьянов А.А. Основные закономерности нанесения алюминия на твердый сплав при получении оксидного покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 1 (121). С. 26 – 31.
10. Табаков В.П., Сизов С.В. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем направленного выбора механических свойств функциональных слоев многослойного покрытия // Вестник МГТУ Станкин. 2017. № 4 (43). С. 16 – 21.
11. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. Article 012019.
12. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Игнатюк В.Д. Термическая обработка неперетачиваемых пластин из твердого сплава Т15К6 непрерывным лазерным излучением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1 (169). С. 26 – 30.
13. Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «твердосплавная основа – износостойкое покрытие» // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 80 – 84.
14. 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 // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76 – 84.
15. Осколкова Т.Н., Глезер А.М. Износостойкие покрытия на WC–Co твердых сплавах, синтезируемые концентрированными потоками энергии // Материаловедение. 2018. № 6. С. 21 – 30.
16. 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.
17. 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.
18. Tyurin A., Nagavkin S., Malikov A., Orishich A. Microstructure of WC–Co hard alloy surface after laser treatment // Surface Engineering. 2015. Vol. 31. No. 1. P. 74 – 77.
19. Zhang F.G. Dry sliding wear mechanism of WC-13Ni hard alloy irradiated by high-intensity pulsed electron beam // Tribology Letters. 2017. Vol. 65. No. 4. Article 143.
20. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брацихин А.А., Ягмуров М.А., Сугаров Х.Р. Особенности изнашивания твердого сплава ВК8, прошедшего объемное импульсное лазерное упрочнение (ОИЛУ), в производственных условиях // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 86 – 91.
21. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брацихин А.А., Ягмуров М.А. Повышение износостойкости твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6 методом объемного импульсного лазерного упрочнения // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 4. С. 429 – 432.
22. Осколкова Т.Н., Будовских Е.А., Горюшкин В.Ф. Особенности структурообразования поверхностного слоя при электровзрывном легировании карбидовольфрамового твердого сплава // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012. № 3. С. 46 – 50.
23. Lisovsky A.F. Physico-chemical bases of forming nanostructures in the binding phase of cemented carbides – In book: Proc. Sci. Powder Metal 1998, World Congress and Exhibition, 18–22 October 1998, Granada, Spain, in 4 vols., Hard Materials, vol. 4. – London: EPMA, P. 115 – 118.
24. Чернявский К.С., Туманов В.И., Конюхова Л.А. и др. Распространение трещин в структуре сплавов WC–Co при различных видах нагружения. Исследование и разработка твердых сплавов. – В кн.: Науч. тр. ВНИИТС. – М.: Металлургия, 1988. С. 24 – 32.
25. Lisovsky A.F., Tkachenko N.V. Composition and structure of cemented carbides produced by MMI-process // Int. Journal of Powder Metallurgy. 1991. No. 3. P. 157 – 161.

Поступила в редакцию 22 июня 2020 г.

После доработки 1 сентября 2020 г.

Принята к публикации 26 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 11-12, pp. 922–928.

INFLUENCE OF PULSE-PLASMA MODIFICATION WITH TITANIUM AND SILICON CARBIDE OF THE SURFACE OF HARD VK10KS ALLOY ON ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

T.N. Oskolkova¹, A.S. Simachev¹, S.I. Yares'ko²

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region - Kuzbass, Russia

² Samara Branch of the P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Samara, Russia

Abstract. Electro-explosive alloying as a method of pulse-plasma treatment consists in accumulation of energy by a battery of pulsed capacitors and its subsequent discharge for 100 μs through a conductor in form of titanium foil with silicon carbide powder, while conductor is under explosive destruction. Method of electro-explosive alloying of tungsten-cobalt hard alloy includes melting of surface and its saturation

with explosion products, followed by self-hardening by removing heat deep into the material and environment. On the surface of VK10KS hard alloy, the coating was obtained with thickness of up to 15 – 20 microns with nanohardness of 26,000 MPa. Using X-ray phase analysis and scanning electron microscopy, it has been established that new phases of TiC, W₂C, (W, Ti)C_{1-x}, WSi₂ with high hardness were formed in the surface layer. As a result, friction coefficient decreased to 0.18 compared to the initial 0.41. Investigations with transmission electron microscopy have revealed changes during electro-explosive alloying that occur in surface carbide and near-surface cobalt phases. Dislocations accumulations were found in the carbide phase. In cobalt binder, deformation bands (slip bands), single dislocations, and finely dispersed precipitates of tungsten carbides were revealed. This change

can be explained by stabilization of cubic modification of cobalt, crystal lattice of which has a large number of slip planes upon deformation and greater ability to harden in comparison with hexagonal modification of cobalt. Additional alloying with cobalt binder in heat affected zone after pulse-plasma treatment have a positive effect on the service life of tungsten-cobalt hard alloys as a whole due to their stabilization.

Keywords: pulse-plasma processing, tungsten-cobalt hard alloys, nanohardness, wear resistance, explosive conductor, microstructure, electro-explosive alloying, surface hardening, roughness, cobalt binder.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-922-928

REFERENCES

1. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Improving performance of carbide tools by targeted selection of rational parameters of wear-resistant coating composition. *STIN*. 2016, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.).
2. Oskolkova T.N. Wear resistant coating on tungsten carbide hard alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, article 012020.
3. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear-resistant coatings. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 2, pp. 105–109.
4. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Current state of the scientific problem of WC – Co hard alloys surface hardening (Review). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 47, no. 12, pp. 980–991. (In Russ.).
5. Tabakov V.P., Khudobin L.V. Improving performance of carbide tools by targeted selection of mechanical properties of the multilayer coating layers according to functional parameters of cutting process. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2018, vol. 14, no. 9 (165), pp. 414–418. (In Russ.).
6. Vereshchaka A.A., Tabakov V.P. Influence of multilayer coating architecture on carbide performance. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 9 (177), pp. 427–429. (In Russ.).
7. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Anikin V.N., Belov D.S., Sergevin V.S. Hardening the hard-alloy edge tool used for cutting of tough-to-machine titanium alloys and chromium-nickel steels with multilayered nanostructured coatings. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015, vol. 56, no. 6, pp. 633–641.
8. Yuan J.H., Ma C.W., Yang S.L., Yu Z.S., Li H. Improving the wear resistance of HVOF sprayed WC-Co coatings by adding submicron-sized WC particles at the splats' interfaces. *Surface & Coatings Technology*. 2016, vol. 285, pp. 17–23.
9. Anikin V.N., P'yanov A.A. Main regularities of aluminum deposition on hard alloy during production of oxide coating. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2015, no. 1 (121), pp. 26–31. (In Russ.).
10. Tabakov V.P., Sizov S.V. Improving the performance of carbide cutting tools by targeted selection of mechanical properties of multilayer coating functional layers. *Vestnik MGTU Stankin*. 2017, no. 4 (43), pp. 16–21. (In Russ.).
11. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, article 012019.
12. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Ignatyuk V.D. Heat treatment of throwaway tips made of T15K6 hard alloy by continuous laser. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 1 (169), pp. 26–30. (In Russ.).
13. Sizov S.V., Tabakov V.P. Modeling impact of pulsed laser treatment on the “Carbide Base – Wear Resistant Coating” composition. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019, no. 6, pp. 80–84. (In Russ.).
14. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on operational properties of T15K6 hard alloy tips. *Izv. vuz. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2018, no. 2, pp. 76–84. (In Russ.).
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.
16. Pinakhin I.A., Chernigovskii V.A., Bratsikhin A.A., Yagmurov M.A., Sugarov Kh.R. Investigation into physico-mechanical properties of VK6, VK8 and T5K10 hard alloys after volumetric pulsed laser hardening. *Inorganic Materials*. 2018, vol. 54, no. 15, pp. 1487–1490.
17. 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.
18. Tyurin A., Nagavkin S., Malikov A., Orishich A. Microstructure of WC–Co hard alloy surface after laser treatment. *Surface Engineering*. 2015, vol. 31, no. 1, pp. 74–77.
19. Zhang F.G. Dry sliding wear mechanism of WC-13Ni hard alloy irradiated by high-intensity pulsed electron beam. *Tribology Letters*. 2017, vol. 65, no. 4, pp. 143.
20. Pinahin I.A., Chernigovskij V.A., Bracihin A.A., Yagmurov M.A., Sugarov H.R. Peculiar properties of BK-8 hard alloy wear after volumetric laser pulsed hardening under production conditions. *Journal of Friction and Wear*. 2017, vol. 38, no. 2, pp. 104–107.
21. Pinahin I.A., Chernigovskij V.A., Bracihin A.A., Yagmurov M.A. Improvement of wear resistance of VK6, VK8, T5K10, and T15K6 hard alloys by volume pulsed laser hardening. *Journal of Friction and Wear*. 2015, vol. 36, no. 4, pp. 330–333.
22. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electro-explosive alloying tungsten carbide hard alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 196–200.
23. Lisovsky A.F. Physico-chemical bases of forming nanostructures in the binding phase of cemented carbides. In: *Proc. Sci. Powder Metal 1998, World Congress and Exhibition, 18–22 October 1998, Granada, Spain, in 4 vols., Hard Materials*, vol. 4. London: EPMA, pp. 115–118.
24. Chernyavskii K.S., Tumanov V.I., Konyukhova L.A. etc. Crack propagation in structure of WC-Co alloys under different types of loading. In: *Nauch. tr. VNIITS [Scientific Papers of VTIITS]*. Moscow: Metallurgiya, 1988, pp. 24–32. (In Russ.).
25. Lisovsky A.F., Tkachenko N.V. Composition and structure of cemented carbides produced by MMI-process. *Int. Journal of Powder Metallurgy*. 1991, no. 3, pp. 157–161.

Acknowledgements. The authors are grateful to E.A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Natural Sciences named after V.M. Finkel for the opportunity to conduct the experiment.

Information about the authors:

T.N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK” (oskolkova@kuz.ru)

A.S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK” (simachev_as@mail.ru)

S.I. Yares'ko, Dr. Sci. (Eng.), Academic Secretary (yaresko@fan.smr.ru)

Received June 22, 2020
Revised September 1, 2020
Accepted October 26, 2020