
MATERIALS. TECHNOLOGIES. DESIGN

УДК 666.3.017
Р.А.С. 81.15.-z

DOI 10.54708/26587572_2025_742387

APPLICATION OF BORON CARBIDE COATINGS BY PULSED ELECTRON BEAM EVAPORATION

Dmitry Alekseevich Shpanov^{1,2}, Ruslan Aleksandrovich Kartavtsov¹, Maxim Sergeevich Vorobyov¹,
Yuriy Fedorovich Ivanov¹, Sergey Yurievich Doroshkevich¹, Elizaveta Alekseevna Petrikova¹,
Nikita Andreevich Prokopenko¹, Maria Stanislavovna Petyukevich^{1,2}, Maria Evgenievna Rygina¹

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademichesky Ave. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave. 30, 634050, Tomsk, Russia

^a das138@tpu.ru

ABSTRACT

Boron carbide coating by pulsed electron evaporation is a modern technology used to create durable and wear-resistant coatings. The work demonstrates the possibility of applying a boron carbide coating to the WC-8%Co hard alloy using the method of pulsed electron evaporation of a target, with preliminary preparation of the sample. The microstructure was analyzed by scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. It was determined that after coating the surface of WC-8%Co, a coating containing the BC₅ phase is formed. The hardness of the coating was 30±1.1 GPa. The results obtained open up prospects for using this method for applying protective, wear-resistant coatings to the surface of hard alloy products.

KEYWORDS

Boron carbide; hard alloys; electron beam evaporation; grid plasma cathode; wear-resistant coatings; thermal evaporation.

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА БОРА МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИСПАРЕНИЯ ТВЕРДОЙ МИШЕНИ

Дмитрий Алексеевич Шпанов^{1,2}, Руслан Александрович Карташов¹,
Максим Сергеевич Воробьев¹, Юрий Федорович Иванов¹, Сергей Юрьевич Дорошкевич¹,
Елизавета Алексеевна Петрикова¹, Никита Андреевич Прокопенко¹,
Мария Станиславовна Петюкович^{1,2}, Мария Евгеньевна Рыгина¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30

^a das138@tpu.ru

АННОТАЦИЯ

Нанесение покрытий из карбида бора методом импульсного электронного испарения (ИЭИ) представляет собой современную технологию, используемую для создания прочных и износостойких покрытий на твердых сплавах.

стойких покрытий. В работе продемонстрирована возможность нанесения покрытия из карбида бора на твердый сплав ВК8 методом импульсного электронного испарения мишени, с предварительной подготовкой образца. Проведен анализ микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазовый анализ. Определено, что после нанесения покрытия на поверхности ВК8 формируется покрытие, содержащее фазу BC_5 . Твердость покрытия составила $30\pm1,1$ ГПа. Полученные результаты открывают перспективы использования данного метода для нанесения защитных, износостойких покрытий на поверхность изделий из твердого сплава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Карбид бора; твердые сплавы; электронно-лучевое испарение; сеточный плазменный катод; износостойкие покрытия; термическое испарение.

Введение

Покрытия карбида бора обладают высокой твердостью, уступая только таким материалам, как алмаз и кубический нитрид бора (при низких и умеренных температурах), в то время как при температурах выше 1100°C твердость карбида бора превышает твердость упомянутых материалов, которые разрушаются чуть выше этой температуры [1–3]. Износостойкость и стойкость к коррозии позволяет использовать данный материал для изготовления сопел пескоструйных аппаратов, фильтров, матриц [4–6].

Применение карбида бора довольно широко и связано напрямую его достоинствами такими как эрозионные характеристики, низкая сорбционная емкость к водороду, устойчивость при высоких энергетических нагрузках позволяют использовать его в качестве защитного покрытия в термоядерных установках [7].

Наиболее широко используемые методы нанесения покрытий, такие как дуговое и магнетронное распыление [8, 9], обладают рядом технологических ограничений, среди которых одной из ключевых проблем является сравнительно низкая скорость осаждения покрытий. В частности, при дуговом испарении карбида бора возникают трудности, связанные с устойчивым инициированием и стабилизацией катодных пятен, что приводит к нестабильности процесса и ухудшению качества покрытий. В случае магне-

тронного распыления накапливание зарядов на поверхности мишени карбида бора приводит к возникновению дуговых разрядов, локальному перегреву и деградации покрытия. Эти ограничения существенно снижают эффективность традиционных методов при осаждении покрытий на основе сложных композиционных или плохо проводящих материалов [10].

Формирование покрытий из карбида бора связано с рядом трудностей, обусловленных физическими свойствами этого материала. В частности, высокая температура плавления и термостабильность затрудняют прогрев частиц до состояния, обеспечивающего хорошее спекание или сцепление с подложкой [11, 12]. Низкая адгезия связана с тем, что карбид бора практически не проявляет пластичности при столкновении с подложкой и, следовательно, плохо деформируется для формирования прочного контакта [13].

Одним из перспективных методов физического осаждения покрытий в вакууме является импульсное электронное испарение (ИЭИ) [14]. Этот способ основан на испарении материала-мишени под воздействием электронного пучка высокой плотности энергии, формируемого в импульсном режиме. В отличие от дугового и магнетронного распыления, метод импульсного электронного испарения обеспечивает существенно более высокую скорость нанесения покрытий, достигающую десятков микрометров в минуту. Особенностью данного метода явля-

ется возможность эффективного испарения как электропроводящих, так и диэлектрических материалов, включая тугоплавкие и композиционные системы. Это становится возможным благодаря высокой локальной мощности импульсного электронного пучка (до 10^7 Вт/см 2) и равномерному распределению энергии по поверхности мишени. Кроме того, импульсный режим позволяет существенно снизить тепловую нагрузку на подложку, термические повреждения, что особенно важно при нанесении покрытий на основе карбида бора.

Целью работы является исследование структуры и свойств покрытия на основе карбида бора, сформированного на поверхности сплава ВК8 методом импульсного электронного испарения твердотельной подложки.

1. Методика эксперимента

Формирование покрытия методом импульсного электронного испарения мишени

осуществляли, используя источник электронов «СОЛО» с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [15, 16]. Указанный плазменный источник электронов обладает рядом конструктивных и функциональных преимуществ, среди которых можно выделить относительную простоту конструкции, отсутствие нагревательных элементов, а также высокую плотность энергии электронного пучка, достигающую ~ 100 Дж/см 2 . Одной из ключевых характеристик источника является слабая взаимозависимость между основными параметрами пучка, что обеспечивает более эффективные условия испарения. Кроме того, система электропитания плазменного катода позволяет в широких пределах варьировать параметры импульсов – длительность, частоту следования и энергетическую мощность в пределах одного импульса, что дает возможность тонкой регулировки энергетического воздействия на мишень [17, 18].

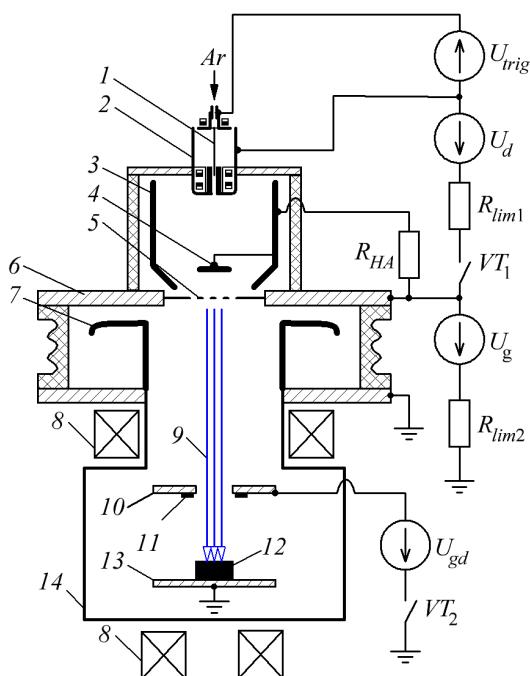


Рис. 1. Схема установки «СОЛО», модифицированной для испарения мишени при помощи электронного пучка:
1 – поджигающий электрод; 2 – катод дугового разряда; 3 – полый анод; 4 – перераспределяющий электрод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – эмиссионный электрод; 7 – извлекающий электрод; 8 – соленоид; 9 – пучок электронов; 10 – диафрагма; 11 – подложка; 12 – мишень; 13 – коллектор; 14 – вакуумная камера

Fig. 1. The scheme of the «SOLO» installation, modified for evaporation a target with an electron beam: 1 – ignition electrode; 2 – arc discharge cathode; 3 – hollow anode; 4 – redistribution electrode; 5 – emission grid; 6 – emission electrode; 7 – extraction electrode; 8 – solenoid; 9 – electron beam; 10 – diaphragm; 11 – substrate; 12 – target; 13 – collector; 14 – vacuum chamber

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Извлечение электронного пучка 9 осуществлялось с границы эмиссионной плазмы, образованной в результате горения дугового разряда между катодом 2 и эмиссионной сеткой 5. Электроны ускорялись постоянным электрическим полем, приложенным между эмиссионным 6 и извлекающим 7 электродами. Сформированный электронный пучок 9 транспортировался к мишени 12 с помощью ведущего магнитного поля, создаваемого соленоидами 8, где нагревал и испарял материал мишени. Пары испаряемого материала осаждались на подложки 11, закрепленные на диафрагме 10.

Мишень 12 представляла собой цилиндр высотой 60 мм, выполненный из карбида бора с небольшим содержанием борида железа (до 3%). Перед воздействием электронного пучка поверхность мишени очищалась изопропиловым спиртом. В качестве подложек 11 использовались образцы твердого сплава ВК8. Для обеспечения высокого качества осаждаемого покрытия поверхность подложек предварительно полировалась, после чего очищалась в ультразвуковой ванне в изопропиловом спирте. Затем подложки фиксировались на диафрагме 10, выполненной из нержавеющей стали и расположенной в вакуумной камере на расстоянии 30 мм от поверхности мишени.

Процесс нанесения покрытия включал две стадии: 1) очистку и нагрев поверхности подложек ионами азота в тлеющем разряде; 2) импульсное электронно-пучковое испарение мишени карбида бора и осаждение паров на подложки.

Для проведения первой стадии диафрагма 10 с закрепленными подложками 11 подключалась к катоду источника питания тлеющего разряда U_{gd} , в то время как анодом служила вакуумная камера 14. Предварительно камера откачивалась до давления порядка 10^{-3} Па, после чего давление повышалось до 60 Па за счет напуска азота, и осуществлялось зажигание тлеющего разряда при напряжении горения 1 кВ и токе 0,3 А. Очистка поверхности подложек тлеющим разрядом проводилась в течение 15 минут. За это время диафрагма с подложками нагревалась до температуры 460 °C, измеренной с помощью термопары.

Проведение второй стадии обработки осуществлялось при давлении в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Генерация импульсного электронного пучка выполнялась при следующих параметрах: ток дугового разряда $I_d = 80$ А, ускоряющее напряжение $U_0 = 13$ кВ, длительность импульса $\tau = 500$ мкс, частота следования импульсов $v = 4$ с⁻¹. Осциллографмы токов и напряжения приведены на рис. 2.

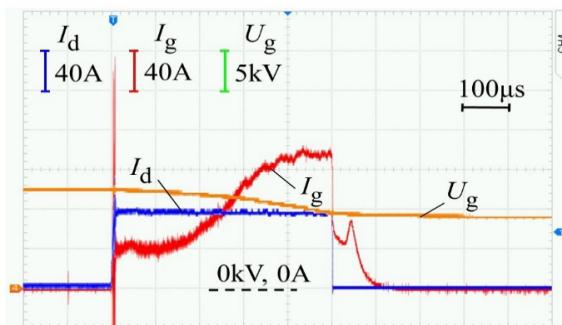


Рис. 2. Осциллографмы режима облучения:

I_d – ток плазменного катодного разряда; I_g – ток в ускоряющем промежутке; U_g – ускоряющее напряжение

Fig. 2. Oscillograms of irradiation mode:

I_d – plasma cathode discharge current; I_g – current in the accelerating gap; U_g – accelerating voltage

В течение первых 200 мкс импульс ток в ускоряющем промежутке I_g (рис. 2) составлял величину 40 А, что соответствует режиму прогрева поверхности мишени. На последующем интервале длительностью 300 мкс регистрируется характерный рост ускоряющего тока, достигающего к концу импульса значения 140 А. Рост тока свидетельствует о переходе процесса в режим интенсивного испарения материала мишени и формировании плотной паровой-плазменной фазы в ускоряющем промежутке. Таким образом, энергия в одном импульсе составляла величину ≈ 500 Дж при средней мощности 1,8 кВт. Процесс осаждения покрытия продолжался 30 минут, к концу этого времени температура подложек составила величину 280 °С.

В табл. 1 приведены основные параметры тлеющего разряда и электронного пучка,

при которых осуществлялось формирование покрытий.

Фазовое состояние исследовали методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре XRD 6000 (Shimadzu, Киото, Япония) в геометрии Брэгга–Брентано с использованием излучения CuK α ($\lambda = 1,5418$ нм); диапазон углов дифракции составлял $2\theta = 15\text{--}90^\circ$, скорость сканирования – 2 град/мин. Структуру и элементный состав изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM 515 Philips).

Микротвердость поверхности определяли на твердомере ПМТ-3 при нормальной нагрузке на индентор 500 мН (ЛОМО, Санкт-Петербург, Россия) [19]. Шероховатость поверхности и профиль поверхности образцов определяли на профилометре TRIBOtechnic в соответствии с ГОСТ 2789-73 [20].

Таблица 1. Режимы работы установки «СОЛО», модифицированной для электронно-лучевого испарения

Table 1. Operating modes of the SOLO installation modified for electron beam evaporation

	Продолжительность процесса, с / Duration of process, s	Кол-во импульсов, N / The number of pulse, N	Давление в камере, Па / Pressure in the chamber, Pa	Напряжение, кВ / Voltage, kW	Частота импульсов, с ⁻¹ / Pulse frequency, s ⁻¹	Макс. тем-ра подложки, Т _{max} , °C / Maximum substrate temperature, T _{max} , °C
Подготовка поверхности / the surface preparation	900	–	60	1	–	460
Электронно-лучевое испарение / electron beam evaporation	0,0005	7000	$3 \cdot 10^{-2}$	13	4	280

2. Результаты и их обсуждение

Сформированы, методом распыления импульсным электронным пучком катода из карбида бора, покрытия на подложках твердого сплава ВК8. Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности под-

ложки, сформировавшейся после распыления катода, представлены на рис. 3. Элементный анализ данных капель показал наличие бора (64,6 вес. %), углерода (20,3 вес. %), железа (7 вес. %) и кислорода (7,5 вес. %), содержание никеля и хрома не превышает 0,5% (рис. 3, б).

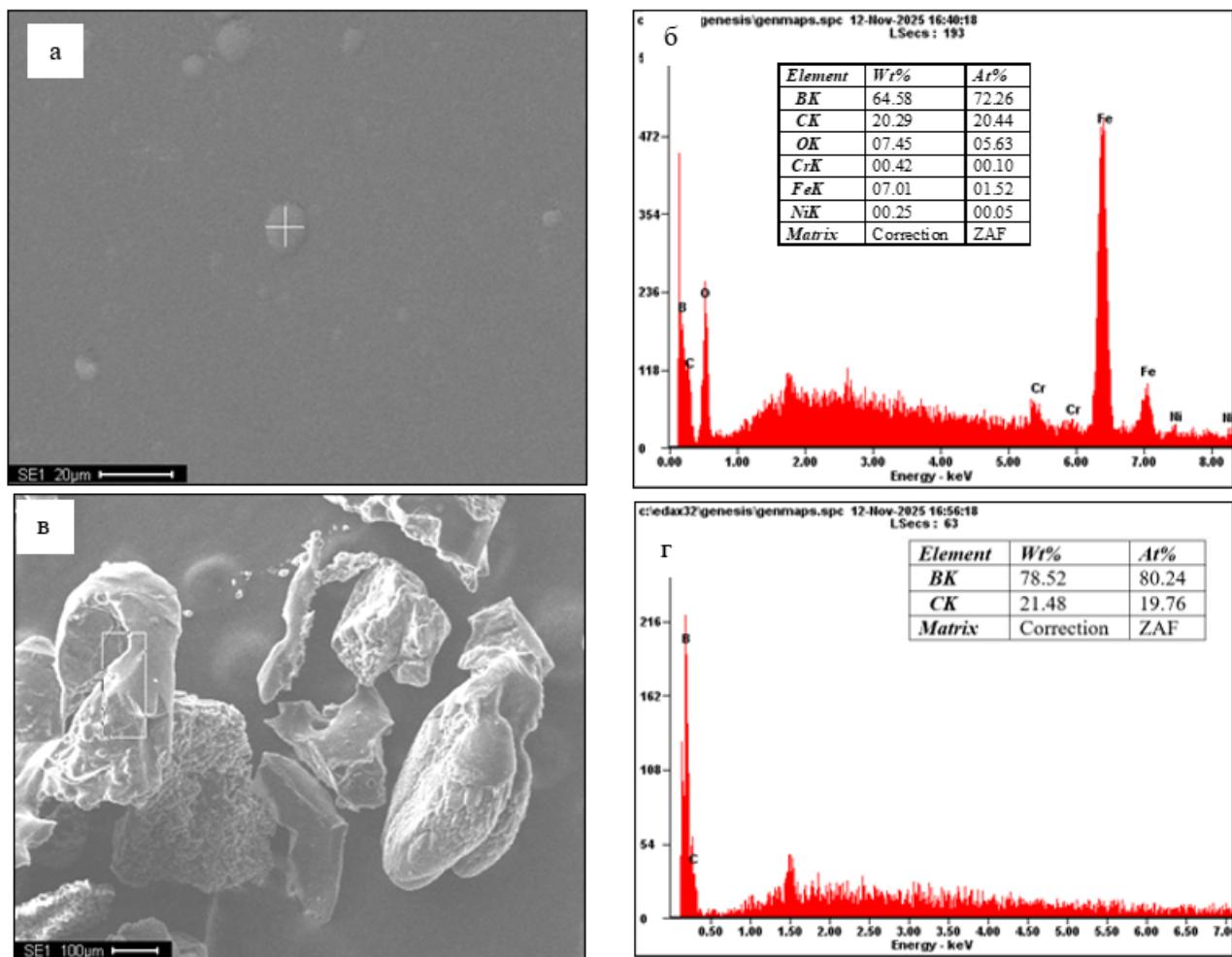


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры:
 а – поверхности карбида вольфрама с покрытием карбид бора, в – частицы порошка, полученные при распылении катода и осажденные на поверхность камеры;
 б, г – энергетические спектры, полученные с участков, обозначенных значком «+» (а) и прямоугольником (в). В таблицах (б, г), показан элементный состав анализируемых участков материала

Fig. 3. Electron-microscopic images of structure:
 a – surfaces of tungsten carbide coated with boron carbide, b – particles of powder obtained by spraying the cathode and deposited on the surface of the chamber; б, г – energy spectra obtained from areas marked «+» (a) and rectangle (b). In the tables (б, г), the elemental composition of the analyzed portions of the material is shown

Одной из проблем при формировании на поверхности материала тугоплавких покрытий является образование капельной фракции. Исследуемое в настоящей работе покрытие содержит сферические частицы капельной фракции (рис. 4, а). Максимальный размер капель составил 26 мкм, минимальный 0,03 мкм. Средний размер капель составил 2 мкм. Отчетливо видно, что большая часть капель имеет размер до 5 мкм. Одна из причин формирования капель на поверхности, кроме недостаточной температуры, заключается в методе нанесения, при котором происходит импульсное нагревание и испарение с поверхности катода материала и его дальнейшее распыление, при котором происходит столкновение частиц и их объединение в капли.

После проведения процесса испарения поверхность мишени оказалась покрыта мелкодисперсными частицами исходного материала, не испарившимися в процессе и представлявшими собой порошкообразный осадок (рис. 3, в). Исследование этого порошка не выявило дополнительных примесей (рис. 3, г).

Методами рентгенофазового анализа выполнены исследования фазового состава и состояния структуры порошка, мишени и сформированного покрытия (рис. 5, табл. 2).

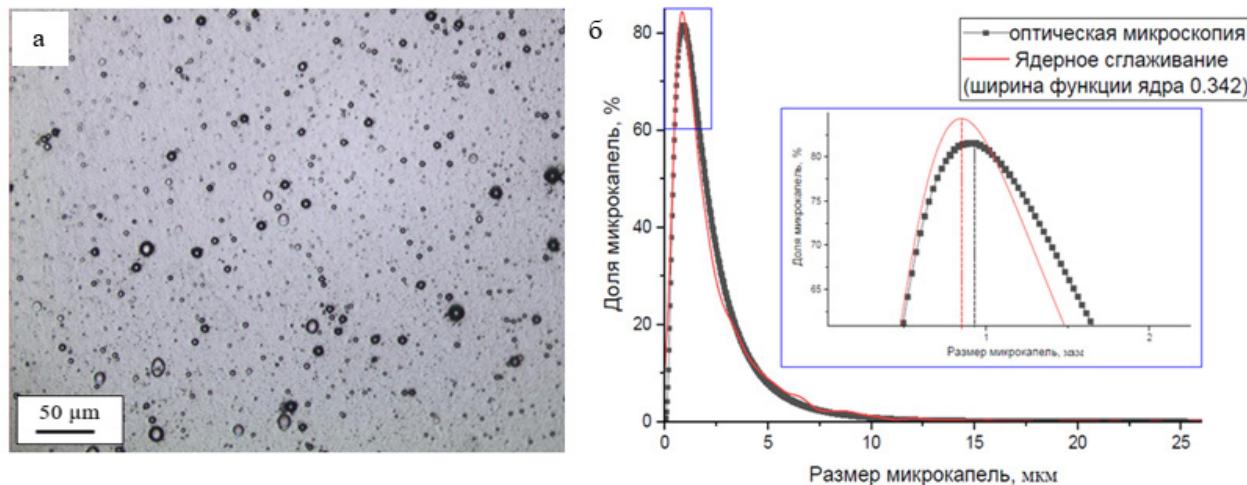


Рис. 4. Оптическое изображение поверхности образца ВК8 после нанесения покрытия карбида бора (а), распределение капель по размерами (б)

Fig. 4. Optical image of the sample's surface of WC-8%Co after applying a boron carbide coating (a), distribution of droplets by size (б)

Для исследования методом рентгенофазового анализа были приготовлены следующие образцы: плоский образец, вырезанный из катода, порошок, собранный со стенок вакуумной камеры установки «СОЛО», и образец подложки с нанесенным покрытием. Рентгенофазовый анализ покрытия выявил содержание BC_5 (47,4 мас.%) и $\alpha\text{-WC}$ (52,6 мас.%). Карбид бора в данной стехиометрии является более дисперсным и напряженным, по сравнению с карбидом бора в стехиометрии B_{13}C_2 , который содержится в мишени. Фаза BC_5 является более плотноупакованной – размер параметров кристаллической решетки и областей когерентного рассеяния уменьшается в 2 и 3 раза, соответственно. Кобальт в составе подложки ВК8 не методами рентгенофазового анализа не обнаруживается ввиду малой концентрации в сплаве.

Поперечный шлиф исследуемого образца ВК8 с покрытием из карбида бора представлен на рис. 6. Микрорентгеноспектральный анализ показал наличие в покрытии вольфрама 85,3 вес.%, кобальт 6,87 вес.%, данные элементы относятся к материалу подложки. Элементы, входящие в состав покрытия – бор 2,28 вес.%, и углерод 5,55 вес.%, который входит в состав как покрытия, так и подложки.

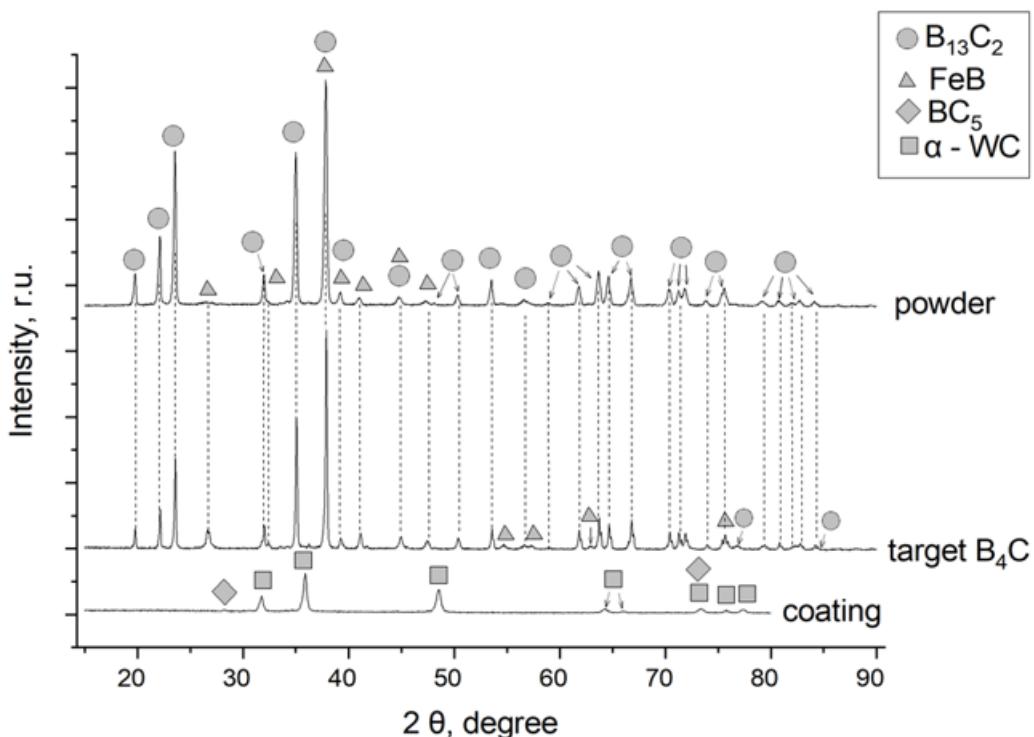


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ (порошка), мишени B_4C , поверхности образца после нанесения покрытия

Fig. 5. X-ray images of boron carbide coated WC-8%Co, goal B_4C (powder is taken) and powder deposited on the walls of the chamber samples

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа карбида бора с покрытием ВК8, мишени B_4C и порошка, нанесенного на стенки камеры образцов

Table 2. Results of X-ray phase analysis of boron carbide with WC-8%Co coating, B_4C target and powder deposited on the walls of the sample chamber

Образец / The sample	Фаза / The phase	Содержание фазы, масс. % / Phase content, mass. %	Параметры решетки, Å / Lattice constant, Å	Размер областей когерентного рассеяния, d, нм / The size of coherent scattering regions, d, nm	Напряжения, $\Delta d/d \cdot 10^{-3}$ / The tension, $\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
Порошок / The powder	$B_{13}C_2$	99,73	a = 5,608, c = 12,100	50,91	1,699
	FeB	0,27	a = 5,558, b = 2,956, c = 4,098	18,54	1,886
Мишень B_4C / The target B_4C	$B_{13}C_2$	97,40	a = 5,600, c = 12,075	86,44	0,127
	FeB	2,60	a = 5,549, b = 2,946, c = 4,091	56,17	0,828
Покрытие / The coating	BC_5	47,4	a = 2,537, c = 6,450	27,00	1,408
	α -WC	52,6	a = 2,889, c = 2,828	27,97	1,954

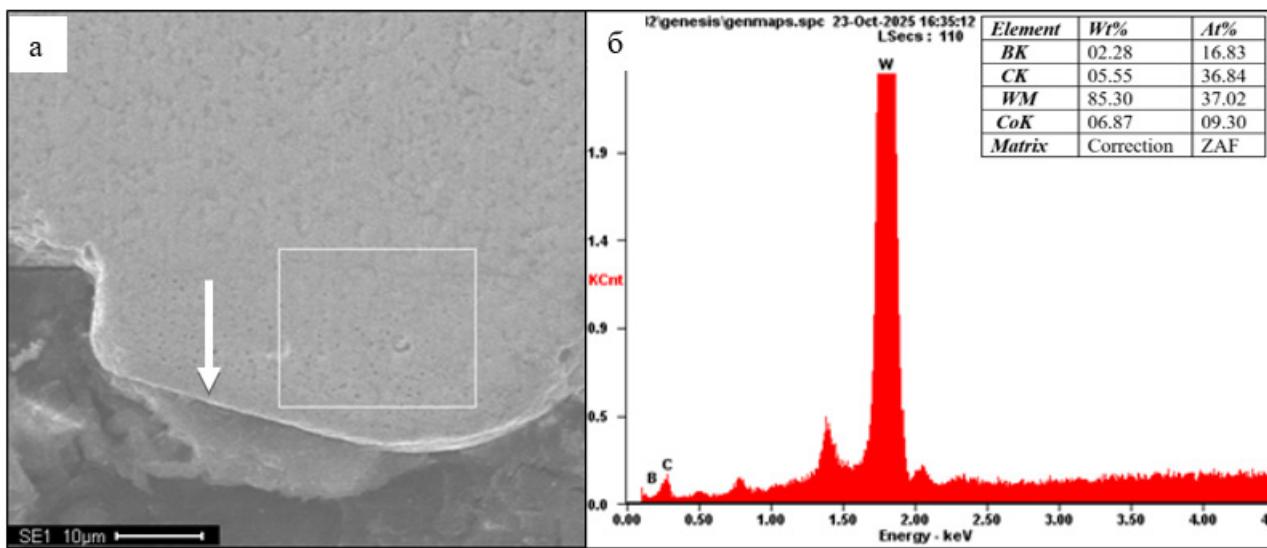


Рис. 6. СЭМ-изображение поверхности поперечного излома (поверхность указана белой стрелкой) (а) и энергетические спектры с участка, выделенного на (а) прямоугольником (б)

Fig. 6. SEM-image of the cross-sectional surface (surface indicated by a white arrow) (a) and energy spectra from the section marked on (a) by the rectangle (b)

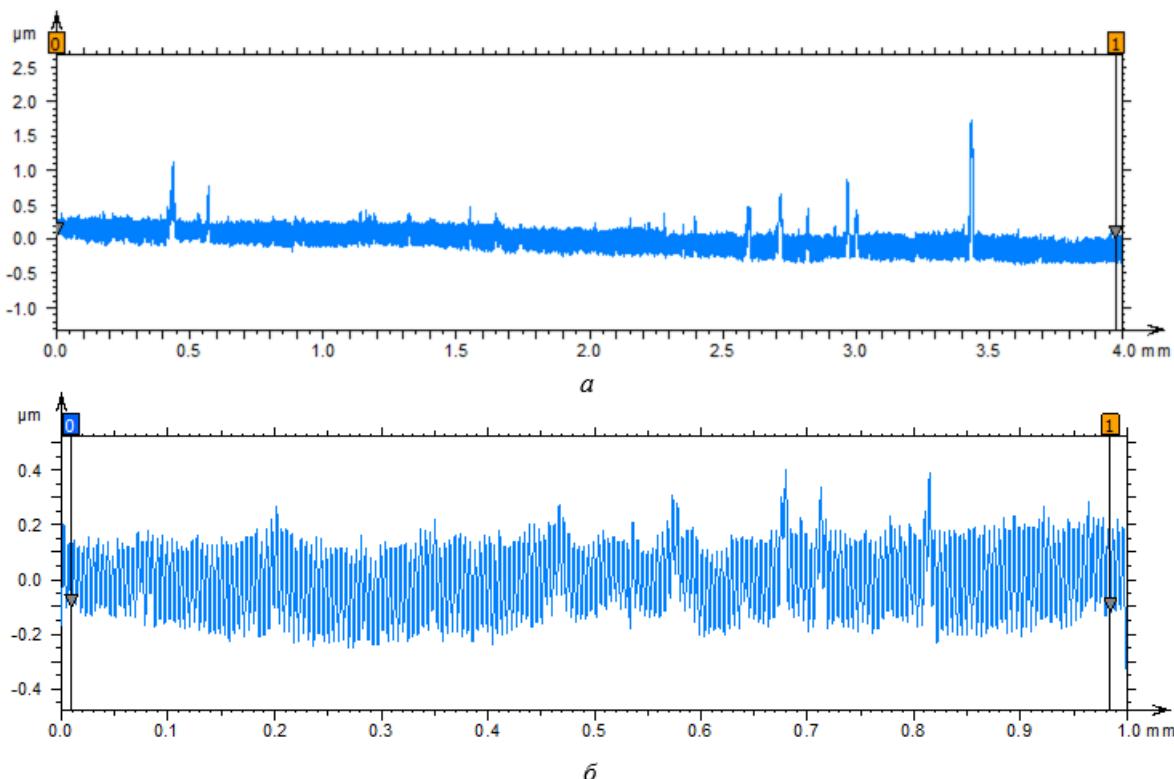


Рис. 7. Профиль поверхности исследуемого образца после нанесения покрытия

Fig. 7. Surface profile of the test sample after coating application

Профиль поверхности системы «покрытие/подложка» приведен на рис. 7. Отчетливо видно, что покрытие нанесено равномерно по всей поверхности образца. Отдельные пики свидетельствуют о наличии на поверхности покрытия частиц капельной фракции. Шероховатость поверхности покрытия, выявленная на основании 5 измерений: $Rz = 0,52 \pm 0,4$ мкм, $Ra = 0,1 \pm 0,2$ мкм.

Микротвердость покрытия, выявленная при нормальной нагрузке на индентор 500 мН, составила $30 \pm 1,1$ ГПа.

Выводы

Продемонстрирована возможность формирования покрытия из карбида бора на поверхности твердого сплава ВК8 методом электронно-пучкового испарения материала катода. Методами рентгенофазового анализа выявлено формирование в покрытии карбида бора BC_5 . Отмечается формирование капельной фракции с неоднородным элементным составом. Размер капель лежит до 5 мкм (более 80%). Согласно данным профилометрии покрытие нанесено равномерно, шероховатость составила $Rz = 0,52 \pm 0,4$ мкм, $Ra = 0,1 \pm 0,2$ мкм. Микротвердость покрытия $30 \pm 1,1$ ГПа.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0006).

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Number: FWRM-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar N., Mukherjee M., and Bandyopadhyay A. Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels // Optics & Laser Technology, 88 24-39 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2016.08.018>

2. Pilipov D.G., Rogachev A.V., Rudenkov A.S., Jiang S.H., Kulesh E.A., Luchnikov P.A. Vacuum-plasma boron-carbon coatings: structure, morphology and mechanical properties // High-tech technologies. 21 (9) 22

32 (2020). (In Russian) [Пилипов Д.Г., Рогачев А.В., Руденков А.С., Цзян С.Х., Кулеш Е.А., Лучников П.А. Вакуумно-плазменные бор-углеродные покрытия: структура, морфология и механические свойства // Наукомые технологии. 21 (9) 22 32 (2020)] DOI: 10.18127/j19998465-202009-03

3. Poznyak I.M., Alyabyev I.A., Podkowyrov V.L., Barsuk V.A., Tsybenko V.Yu., Biryulin E.Z., Fedulaev E.D., Novoselova Z.I. Behavior of tungsten with a boron carbide coating under the influence of intense plasma flows // Issues of atomic science and technology. Series: Thermonuclear synthesis. 47 (S1) 99 110 (2024). (In Russian) [Позняк И.М., Алябьев И.А., Подковыров В.Л., Барсук В.А., Цыбенко В.Ю., Бирюлин Е.З., Федулаев Е.Д., Новоселова З.И. Поведение вольфрама с покрытием из карбида бора при воздействии интенсивных плазменных потоков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 47 (S1) 99 110 (2024)]. DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-99-110

4. Brazhkin V. V., Lyapin A. G., Hemley R. J. Harder than diamond: Dreams and reality // Philosophical magazine a: physics of condensed matter, structure, defects and mechanical properties. 82 (2) 231–253 (2002). DOI: 10.1080/01418610208239596

5. Voevodin A. A., Donley M. S., Zabinski J. S., Bultman J. E. Mechanical and tribological properties of diamond-like carbon coatings prepared by pulsed laser deposition // Surface and Coatings Technology. 76–77 (2) 534 539 (1995). DOI: 10.1016/0257-8972(95)02521-9

6. Bintseva A.A., Kornienko E.E., Kuzmin V.I. Plasma spraying of coatings from boron carbide powders // Actual problems in mechanical engineering. 7 (1-2) 122-127 (2020). (In Russian) [Бинцева А.А., Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И. Плазменное напыление покрытий из порошков карбида бора // Актуальные проблемы в машиностроении. 7 (1-2) 122-127 (2020)].

7. Begrambekov L.B., Buzhinsky O.I. Properties of boron carbide and its use as protective coatings on the first wall of a tokamak // Issues of atomic science and technology. Series: Thermonuclear synthesis. 4 14-20 (2006). (In Russian) [Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И. Свойства карбида бора и его использование в качестве защитных покрытий на первой стенке токамака // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 4 14-20 (2006)].

8. Патент № 2848006 С1 Российская Федерация, МПК C23C 14/06, C23C 14/35. Нанесение тонких пленок карбида бора магнетронным распылением порошковой мишени : заявл. 24.12.2024 : опубл. 16.10.2025 / Н. В. Гаврилов, Д. Р. Емлин, А. Б. Владимиров [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

9. Azizov E.A., Airapetov A.A., Begrambekov L.B., Buzhinsky O.I., Vergazov S.V., Grunin A.V., Gordeev A.A., Zakharov A.M., Kalachev A.M., Mazul I.V., Rakhmanov R.A., Sadovsky Ya.A., Shigin P.A. Installation for applying boron carbide coating and testing materials and coatings under intense plasma // Issues of Atomic Science and Technology. Series: Thermonuclear Fusion. 37(4) 30 38 (2014). (In Russian) [Азизов Э.А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И., Вергазов С.В., Грунин А.В., Гордеев А.А., Захаров А.М., Калачев А.М., Мазуль И.В., Рахманов Р.А., Садовский Я.А., Шигин П.А. Установка для нанесения покрытия карбида бора и тестирования материалов и покрытий при интенсивном плазменном // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 37(4) 30 38 (2014)].

10. Zhou B., Pilipsov D.G., Jiang S., Kulesh E.A., Rudenkov A.S. Boron-carbon coatings: methods of production, features of structure and mechanical properties // Problems of Physics, Mathematics and Technology. 3(40) 7 12 (2019). (In Russian) [Джоу Б., Пилипцов Д.Г., Цян С., Кулеш Е.А., Руденков А.С. Бор-углеродные покрытия: методы получения, особенности структуры и механических свойств // Проблемы физики, математики и техники. 3(40) 7 12 (2019)].

11. Andrievsky, R. A. Micro- and nanosized boron carbide: synthesis, structure and properties // Uspekhi khimii. 81(6) 549 559 (2012). (In Russian) [Андреевский, Р. А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства // Успехи химии. 81(6) 549 559 (2012)].

12. Zinin P.V., Bykov A.A., Romanov R.I., Korneeva A.A., Andreev A.V., Belykh A.Yu., Krasnoborodko S.Yu., Kukushkin V.A. Atomic force visualization of conductivity and surface morphology of BCx films obtained by laser deposition // Avtometriya. 60(2) 81 87 (2024). (In Russian) [Зинин П.В., Быков А.А., Романов Р.И., Корнеева А.А., Андреев А.В., Белых А.Ю., Краснобородько С.Ю., Кукушкин В.А. Атомно-силовая визуализация проводимости и морфология поверхности BCx-пленок, получаемых методом лазерного напыления // Автометрия. 60(2) 81 87 (2024)]. DOI: 10.15372/AUT20240210.

13. Ipatov A.G., Kharanzhevsky E.V., Dorodov P.V., Shmykov S.N., Malinin A.V. On the issue of adhesive strength of ceramic coatings with a steel surface // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. 4(72) 58 64 (2022). (In Russian) [Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В., Дородов П.В., Шмыков С.Н., Малинин А.В. К вопросу адгезионной прочности керамических покрытий со стальной поверхностью // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 4(72) 58 64 (2022)]. DOI: 10.48012/1817-5457_2022_4_58-64.

14. Cherepanov D.E., Burdakov A.V., Vyacheslavov L.N., Kazantsev S.R., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Krasilnikov A.V., Popov V.A., Ryzhkov G.A., Shoshin A.A. Testing of boron carbide coatings under pulsed thermal load possible in the ITER tokamak divertor zone // Issues of Atomic Science and Technology. Series: Thermonuclear Fusion. 47(S1) 89 98 (2024). (In Russian) [Черепанов Д.Е., Бурдаков А.В., Вячеславов Л.Н., Казанцев С.Р., Кандауров И.В., Касатов А.А., Красильников А.В., Попов В.А., Рыжков Г.А., Шошин А.А. Испытания покрытий из карбида бора импульсной тепловой нагрузкой, возможной в диверторной зоне токамака ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 47(S1) 89 98 (2024)]. DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-89-98.

15. Ulakhanov N. S., Moskvin P. V., Mishigdorzhii U. L., Semenov A. P., Koval N. N., Vorobyov M. S. Modification of diffusion boron and aluminum containing layers by electron beam processing // Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation 1 62 75 (2024). (In Russian) [Улаханов Н. С., Москвин П. В., Мишигдоржий У. Л., Семенов А. П., Коваль Н. Н., Воробьев М. С. Модификация диффузионных бор и алюминий содержащих слоев электронно-пучковой обработкой // Доклады АН ВШ РФ 1 62 75 (2024)]. DOI: <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2024-1-62-75>

16. Scientific and technological infrastructure of the Russian Federation. A complex of unique electrophysical installations for effective electron-ion-plasma modification of the surface of materials and products «UNIQUE» <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216>. Accessed August 24, 2024.

17. Vorobyov M.S., Ashurova K.T., Ivanov YU.F., Moskvin P.V., Petrikova E.A., Petyukevich M.S., Rygina M.E, Shin V.I., Doroshkevich S.YU. Treatment of silumin surface by a modulated submillisecond electron beam // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 26 (4) 1 10 (2022). DOI: 10.1615/hightempmatproc.2022043754

18. Rotshtein V.P., Proskurovsky D.I., Ozur G.E., Ivanov Yu. F. Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams // Surface and Coatings Technology. 180(1), 377 381 (2004). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.085>

19. GOST 2999-75. Metals and alloys. Vickers hardness test method. – Moscow: Publishing House of Standards, 1987. P. 31 (In Russian) [ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. 31 с.].

20. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow: Standartinform, 2005. P. 6. (In Russian) [ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Москва: Стандартинформ, 2005. 6 с.].