

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21. № 1. С. 91–100
Fundamental'nyye problemyi sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2024; 1(21): 91–100

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.762; 62-408.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.011

СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ 35 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПОРОШКОМ, ПОЛУЧЕННЫМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ТВЕРДОГО СПЛАВА Т5К10

Максим Иванович Дворник¹, Елена Альбертовна Михайленко^{2†},
Александр Анатольевич Бурков³, Александра Юрьевна Быцуро⁴

^{1, 2, 3, 4} Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, ул. Тихоокеанская, 153, 680042, Хабаровск, Россия

¹ maxxxx80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1216-4438>

² mea80@list.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-4515-9109>

³ burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

⁴ alex_btsr@mail.ru

Аннотация. В работе электроэрозионным диспергированием сплава Т5К10 в масле получен порошок, который был нанесен на заготовки из стали 35 методом электроискрового легирования нелокализованным электродом, исследованы состав, структура и свойства полученных покрытий. Определены химический и фазовый составы и микроструктура полученных частиц. Установлено, что при электроэрозионном диспергировании в образующихся частицах порошка происходит полное растворение исходного карбида вольфрама в кубическом карбиде (Ti,W)C. Исследования кинетики массопереноса при электроискровом легировании нелокализованным электродом показали, что полученный порошок наносится вместе со стальными гранулами со скоростью 1,9-2,6 мг/(см²·мин). Полученные покрытия состоят из вольфрам-содержащих и железосодержащих фаз, элементы которых равномерно распределены по глубине покрытия. Концентрация элементов W, Ti, Co в покрытиях зависит от соотношения масс порошка и стальных гранул в наносимом порошке. Испытания показали, что, благодаря высокой концентрации легирующих элементов в покрытиях, они обладают высокой твердостью (6,4 ГПа-9,2 ГПа) и пониженной скоростью износа (0,13·10⁵-0,39·10⁵ мм³/Нм) по сравнению с исходной сталью 35 (2,6 ГПа и 2,47·10⁵-2,65·10⁵ мм³/Нм соответственно).

Ключевые слова: покрытие, электроискровое легирование нелокализованным электродом, сталь 35, твердый сплав Т5К10, электроэрозионное диспергирование, порошок.

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию ХФИЦ ДВО РАН (075-01108-23-01).

Для цитирования: Дворник М.И., Михайленко Е.А., Бурков А.А., Быцуро А.Ю. Создание износостойких покрытий на стали 35 методом электроискрового легирования порошком, полученным электроэрозионным диспергированием твердого сплава Т5К10 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 1. С. 91–100. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.011.

Original article

CREATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS ON STEEL 35 BY THE METHOD OF ELECTROSPARK ALLOYING WITH POWDER OBTAINED BY ELECTROEROSIVE DISPERSION OF T5K10 CARB ALLOY

Maksim I. Dvornik¹, Elena A. Mikhailenko^{2†}, Alexander A. Burkov³, Alexandra Yu. Bytsura⁴

^{1, 2, 3, 4} Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS, Tikhookeanskaya Str., 153 Khabarovsk, 680042, Russia

¹ maxxxx80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1216-4438>

² mea80@list.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-4515-9109>

³ burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

⁴ alex_btsr@mail.ru

Abstract. In the work, by electroerosive dispersion of the T5K10 alloy in oil, a powder was obtained, which was applied to workpieces made of steel 35 by the method of electric spark alloying with a non-localized electrode, the composition, structure and properties of the resulting coatings were studied. The chemical and phase compositions and microstructure of the resulting particles were determined. It has been established that during electroerosive dispersion in the resulting powder particles, complete dissolution of the original tungsten carbide in cubic carbide (Ti,W)C occurs. Studies of the kinetics of mass transfer during electric spark alloying with a non-localized electrode have shown that the resulting powder is deposited together with steel granules at a rate of 1.9-2.6 mg/(cm²·min). The resulting coatings consist of tungsten-containing and iron-containing phases, the elements of which are evenly distributed throughout the depth of the coating. The concentration of the elements W, Ti, Co in coatings depends on the ratio of the masses of the powder and steel granules in the applied powder. Tests have shown that, due to the high concentration of alloying elements in the coatings, they have high hardness (6.4 GPa-9.2 GPa) and a reduced wear rate (0.13·10⁵-0.39·10⁵ mm³/Nm) compared to the original steel 35 (2.6 GPa and 2.47·10⁵-2.65·10⁵ mm³/Nm, respectively).

Keywords: coating, electric spark alloying with a non-localized electrode, steel 35, T5K10 hard alloy, electroerosive dispersion, powder.

Acknowledgements: The work was carried out according to the state assignment of the KhFRC FEB RAS (075-01108-23-01).

For citation: Dvornik, M. I., Mikhailenko, E. A., Burkov, A. A. & Bytsura, A. Yu. (2024). Creation of wear-resistant coatings on steel 35 by the method of electrospark alloying with powder obtained by electroerosive dispersion of T5K10 card alloy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 91–100. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.011.

Введение

Сталь 35 является распространенным материалом для изготовления коленчатых валов, осей, шатунов, шпинделей, звездочек, дисков, пальцев, кулачков, толкателей и т.д. [1]. Низкая износостойкость ограничивает ее применение [2]. Известно, что нанесение защитных покрытий позволяет улучшить износостойкость среднеуглеродистых сталей [3, 4].

Перспективными материалами для покрытий являются металлокерамические композиты, сочетающие функциональные свойства металлической матрицы и твердой армирующей керамики. Наносить покрытия на сталь можно методом ЭИЛНЭ – электроискровым легированием нелокализованным электродом, используя в качестве нелокализованного электрода (НЭ) железные гранулы и металлокерамический порошок [5]. Твердый сплав является одним из наиболее дешевых и износостойких металлокерамических композитов, доступных для применения в промышленности. После применения по основному назначению (резание) его можно использовать для нанесения покрытий [6, 7]. Наиболее перспективными являются титансодержащие твердые сплавы (WC–TiC–Co), которые благодаря наличию карбида титана обладают пониженной адгезией к стали. Отходы твердых сплавов накапливаются в виде отработанных пластин на металлообрабатывающих

предприятиях. Прямая переработка на металлургических комбинатах таких пластин для получения порошков затратна, так как твердые сплавы обладают высокой твердостью, жаростойкостью до 600-900 °С, износостойкостью и химической стойкостью.

Одним из методов получения твердосплавных ультрамелкозернистых порошков является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) отходов [8-10]. Этот метод основан на образовании частиц под воздействием искрового разряда в диэлектрической жидкости. В искровом разряде поверхность электродов нагревается до 10⁴ °С, что приводит к плавлению и кипению исходного материала внутри образующегося в процессе парового пузыря. После завершения искрового разряда расплавленный и кипящий материал выбрасывается в межэлектродный промежуток и охлаждается со скоростью 10⁶-10⁹ К/с. В результате быстрого охлаждения формируются наноструктурные и ультрамелкозернистые частицы преимущественно сферической формы диаметром 1-100 мкм, содержащие высокотемпературные фазы и пересыщенные твердые растворы.

В работах показана возможность получения методом ЭЭД титансодержащих твердых сплавов порошков определенного состава, которые пригодны для нанесения износостойких покрытий, в том числе на сталях [8, 11-14]. Работы по нанесению покрытий методом ЭИЛНЭ

порошками, полученными методом ЭЭД, не проводились. Можно ожидать, что использование порошков, состоящих из наноструктурных частиц сферической формы диаметром до 100 мкм, полученных методом ЭЭД, позволит создавать наноструктурные покрытия, которые за счет повышенной твердости и пониженной адгезии будут обладать повышенной износостойкостью. Наличие кобальта, равномерно распределенного в частицах исходного порошка, должно улучшить условия для нанесения покрытия.

Целью работы является исследование состава, структуры, микротвердости и износостойкости покрытий на стали 35, полученных методом ЭИЛНЭ с использованием порошка, синтезированного переработкой твердого сплава Т5К10 методом ЭЭД.

Методика

Исходным материалом для ЭЭД служил среднезернистый твердый сплав WC-5TiC-10Co (85 % WC, 5 % TiC и 10 % Co) производства компании КЗТС. ЭЭД выполнено на специальной установке, состоящей из генератора импульсов, сосуда, неподвижных электродов WC-5TiC-10Co (анод и катод), встряхивателя (вибрационное сито FRITSCHE «Analysette 3»), перистальтического насоса (EcoLine VC-280), сосуда для отстаивания [15]. Диэлектрическая жидкость, используемая для ЭЭД, постоянно прокачивалась через сосуд с электродами и уносила образовавшийся порошок в сосуд для отстаивания. В качестве диэлектрической жидкости использовали вазелиновое масло. Диспергирование проводили при напряжении холостого хода 250 В длительностью 500 мкс. Средняя энергия импульсов, рассчитанная по вольтамперным характеристикам, составила 6,4 Дж. Производительность и энергозатраты определяли по массе полученного порошка и вольтамперным характеристикам. Полученный порошок сушили при 600 °С в вакуумной печи Carbolite STF. После морфологического, фазового и химического анализов, полученный порошок наносили на заготовку из стали 35.

В качестве подложки использовали цилиндры из стали 35 диаметром 12 мм и высотой 10 мм. НЭ состоял из смеси железных гранул с добавлением разного количества полученного порошка (табл.1). Гранулы были изготовлены в форме цилиндров длиной 4 ± 1 мм из стальной сварочной проволоки Св-08АА. Генератор разрядных импульсов IMES-40 вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы, амплитудой

110 А, при напряжении 30 В, длительностью 100 мкс с периодом 1000 мкс. Подложку подключали к отрицательному выводу генератора импульсов, а контейнер с гранулами и порошком – к положительному. Подложку на половину высоты погружали в слой гранул. Схема установки для электроэрозионного осаждения покрытий нелокализованным электродом подробно описана в работе [6]. В рабочий объем контейнера подавали аргон со скоростью 5 л/мин для предотвращения образования оксидов. Предварительно проводили приработку гранул для насыщения их поверхности порошком в течение 10 минут. Общее время нанесения покрытия также составляло 10 минут.

Таблица 1. Состав наносимой смеси и обозначение покрытий

Table 1. Composition of the applied mixture and designation of coatings

Обозначение образцов	Железные гранулы Св-08АА, об %	Порошок Т5К10, об %
A2	98	2
A4	96	4
A6	94	6

Содержание углерода определяли с помощью анализатора EMIA 320V2. Фазовый состав порошков и покрытий исследовали с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в Си-Ка излучении. Линии рентгенодифракционного спектра идентифицировали по базе данных PDWin. Морфологический анализ порошка, микроструктура полученных покрытий и их элементный состав изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3 LMN (Tescan, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) X-max 80 (Oxford Instruments). Твердость покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н по методу Виккерса. Износостойкость покрытий исследовали по стандарту ASTM G99-17 при сухом трении скольжения, с применением контртела в виде диска из быстрорежущей стали Р6М5 на скорости $0,47 \text{ мс}^{-1}$ при нагрузках 25 и 70 Н. Было проведено не менее трех измерений для каждого образца. Износ измеряли гравиметрическим способом с точностью 0,1 мг и рассчитывали интенсивность изнашивания по формуле:

$$W = \Delta m / (\rho P L),$$

где Δm – потеря массы образца при истирании, ρ – плотность покрытия, которая прини-

малась равной плотности стали 35, P – нагрузка, l – длина пути трения. Образцы подвергались трению попеременно после каждого акта измерения массы для устранения погрешности, вводимой возможным изменением свойств поверхности контртела.

Результаты и обсуждение

Исходный сплав T5K10 состоял из зерен WC и (W,Ti)C, пространство между которыми заполнено кобальтом (рис.1а). В результате диспергирования этого сплава был получен порошок, состоящий из сферических частиц диаметром до 100 мкм, образованных кристаллизацией жидкой фазы, которые были покрыты агломератами нанодисперсных частиц (рис.1б). Также порошок содержит нанодисперсные частицы, которые образуются в результате кристаллизации паровой фазы и пиролиза углеводородов. Полученный порошок имеет харак-

терный методу морфологический и гранулометрический [10, 11, 15].

Фазовый анализ показал, что при ЭЭД происходит растворение гексагонального карбида вольфрама в кубическом карбиде (W,Ti)C в результате быстрого плавления и кристаллизации образовавшегося расплава (рис.2). Полученный порошок состоит преимущественно из фазы (W,Ti)C. При этом исходный гексагональный карбид вольфрам (α -WC) полностью исчезает. Производительность процесса и удельные энергозатраты составили 27 г/час и 4,8 кВтч/кг. Концентрация углерода в полученном порошке составила 9,8 % что на 3,8 % выше содержания углерода в исходном сплаве (6,1 %). Допуская, что выделение углерода из частиц было минимальным, весь избыточный углерод (3,8 %) является свободным. Наличие свободного углерода должно компенсировать выгорание углерода при нанесении покрытия на воздухе и способствовать сохранению карбидов, обладающих высокой твердостью.

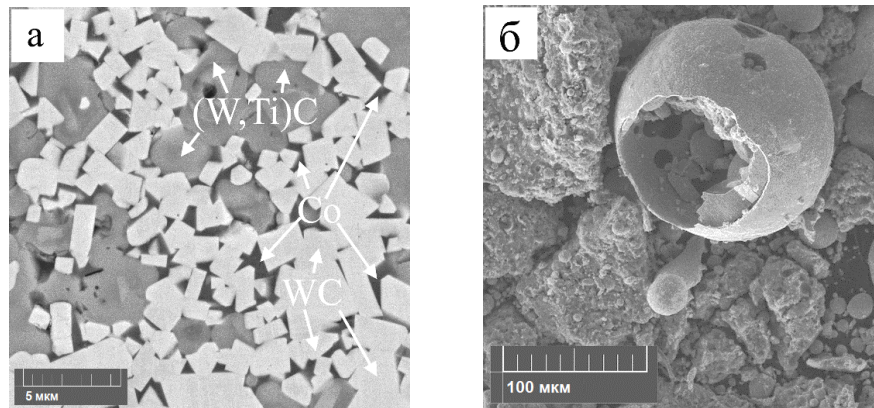


Рис.1. Микроструктура исходного твердого сплава WC–5TiC–10Co (а), порошок, полученный ЭЭД в масле (б)

Fig.1. Microstructure of the initial hard alloy WC–5TiC–10Co (a), powder obtained by EED in oil (b)

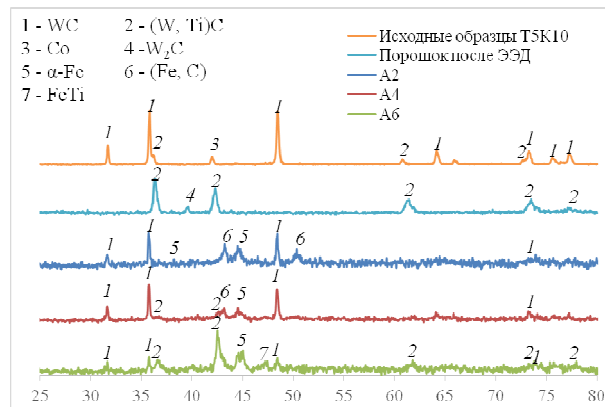


Рис.2. Фазовый состав исходного материала, диспергированных порошков и полученных покрытий

Fig.2. Phase composition of the starting material, dispersed powders and resulting coatings

Исследование кинетики привеса катода показывает эффективность осаждения покрытий при ЭИЛ (в случае отрицательного ЭИЛ был бы не эффективен). Исследования кинетики нанесения покрытия показали, что при максимальной концентрации порошка (6 %) скорость нанесения покрытия (привеса катода) достигает максимальной величины (2,6 мг/(см²·мин). Удельная масса покрытия, нанесенного за 10 минут, составила 23,9 мг/см². При уменьшении концентрации порошка в смеси до 4 % и 2 % производительность уменьшилась на 27 % до 1,9 мг/(см²·мин). Удельная масса нанесенных покрытий уменьшилась до 18,1 мг/см².

Фазовый анализ показал, что полученное при наименьшей концентрации порошка (образец А2) покрытие состоит из фаз железа, его карбида и карбида вольфрама (рис.3). При увеличении концентрации порошка до 4 % (образец А4) интенсивность рефлексов WC возрастает и появляются рефлексы фазы (W,Ti)C. При дальнейшем увеличении концентрации порошка в исходной смеси происходит увеличение концентрации фазы (W,Ti)C. В образце А6, полученном при концентрации 6 % порошка в смеси, фаза (W,Ti)C превалирует на дифрактограмме. Судя по интенсивности пиков содержание титансодержащего карбида (W,Ti)C превышает содержание этого же карбида, получаемого напрямую нанесением твердосплавными электродами [7, 13, 16].

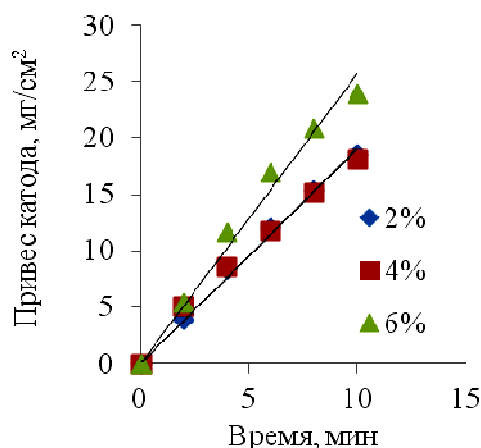


Рис.3. Кинетика массопереноса

Fig.3. Kinetics of mass transfer

EDS анализ показал (рис.4), что покрытие состоит из смеси элементов порошка (W,Ti,Co) и железа, содержание которых увеличивается при увеличении концентрации порошка в исходной смеси. При этом соотношение вольфрама, титана и кобальта эквивалентно соотношению этих же элементов в исходном сплаве Т5К10. В образце А2 концентрация элементов покрытия (W,Ti,Co) составляет 22 ± 4 %. В образце А6 концентрация элементов покрытия увеличивается до 50 ± 4 %. Распределение элементов по глубине покрытия изменяется незначительно.

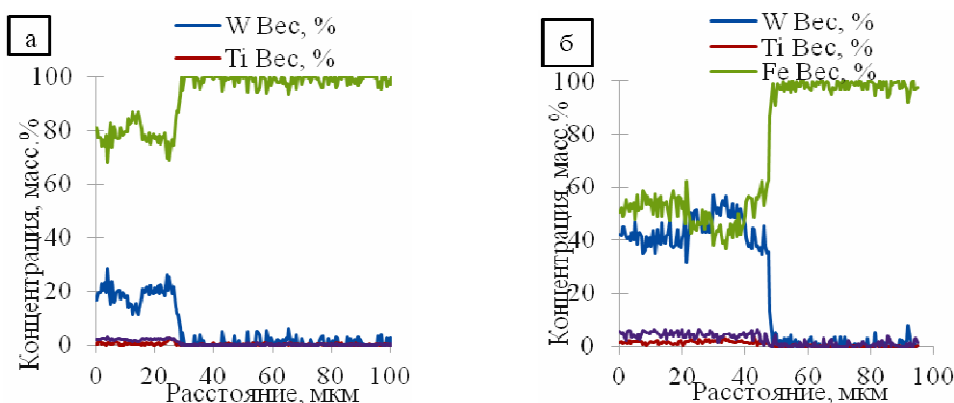


Рис.4. Распределение элементов по глубине покрытия в образцах А2 (а) и А6 (б)

Fig.4. Distribution of elements along the coating depth in samples А2 (а) and А6 (б)

Микроструктура полученных покрытий однородна и не содержит крупных включений отдельных фаз (рис.5). То есть при ЭИЛ происходит растворение всех компонентов (Fe,Ti,W,Co) в образовавшемся расплаве, нанесение расплава на поверхность и кристаллиза-

ция расплава в виде непрерывных гомогенных твердых растворов. При максимальном увеличении можно разглядеть скопления вольфрама вытянутой формы (рис.5б,в), которые вероятно выделяются по границам зерен. В образце с большим содержанием вольфрама (А6) при

максимальном увеличении можно разглядеть скопления ультрадисперсных зерен карбида вольфрама характерной квадратной и призматической формы вблизи границы раздела. На-

несение полученного порошка в смеси со стальными гранулами привело к получению сплошного покрытия.

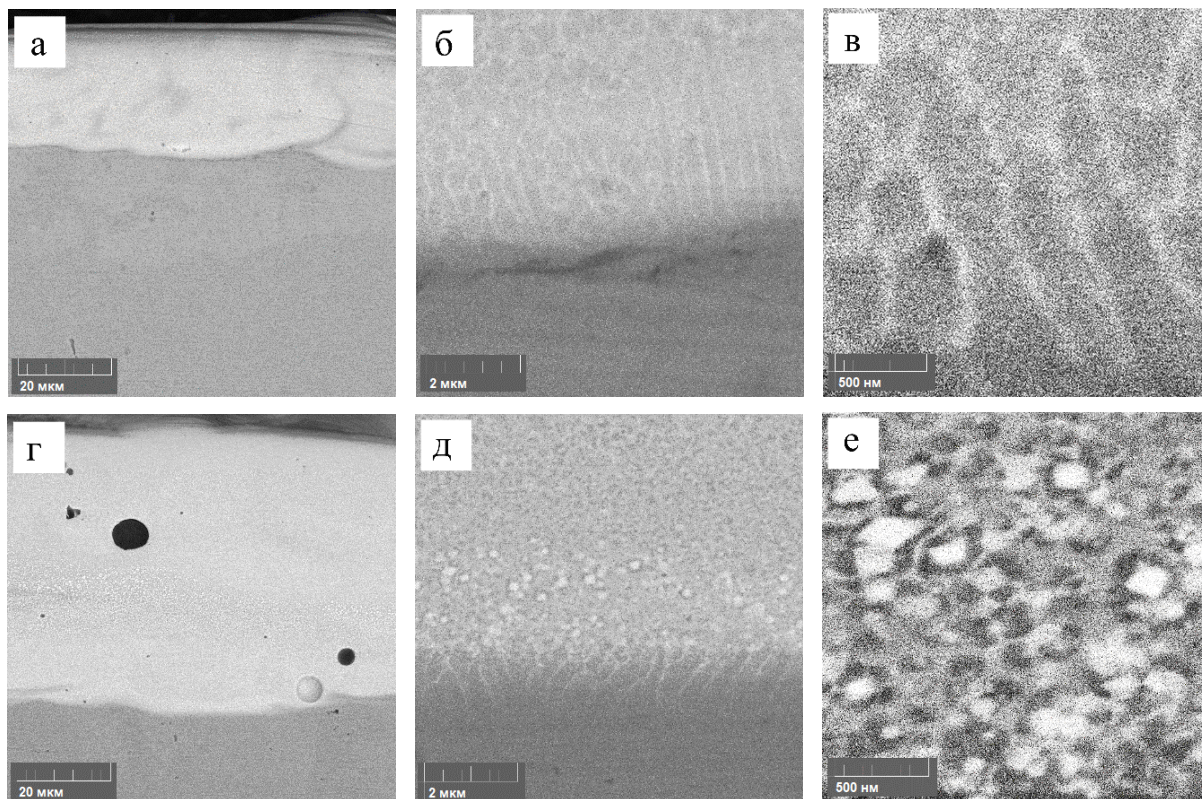


Рис.5. Микроструктуры покрытий, полученных при содержании порошка 2 % (а-в) и 6 % (г-е)

Fig.5. Microstructures of coatings obtained with a powder content of 2 % (a-c) and 6 % (d-f)

Микротвердость полученных покрытий в 2,4-3,5 раза выше микротвердости стали 35 (рис.6). При увеличении концентрации порошка в наносимой смеси с 2% до 6% увеличивается микротвердость получаемых покрытий с 6,4 до 9,3 ГПа. Это происходит в результате увеличения концентрации карбидов в получаемом покрытии, обнаруженное ранее. Микротвердость WC составляет 20-30 ГПа [17-19] в зависимости от размера зерен. Микротвердость (W,Ti)C превышает 20 ГПа [20]. Микротвердость частиц, полученных ЭЭД, превышает 20 ГПа из-за высокой концентрации нанодисперсных карбидов вольфрама и титана [15]. Твердость полученных покрытий оказалась ниже из-за высокой концентрации железа. Железо необходимо для снижения хрупкости покрытия и предотвращения растрескивания покрытия из-за наличия термических напряжений.

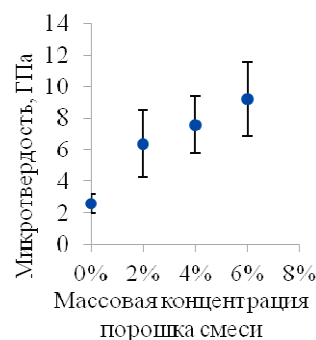


Рис.6. Зависимость твердости от массовой концентрации порошка

Fig.6. Dependence of hardness on mass concentration of powder

Испытания показали, что коэффициент трения покрытий изменялся монотонно в узком диапазоне из-за относительно медленного разрушения поверхности (рис.7а). В то же время коэффициент трения стали без покрытия постоянно колебался из-за разрушения поверхности

(рис.7). Коэффициент трения без нагрузки изменялся незначительно при нагрузке 25 Н (рис.7а) и монотонно увеличивался при нагрузке 70 Н (рис.7б). Лишь при наибольшем содержании карбидов вольфрама и титана (образец А6) коэффициент трения при нагрузке 70 Н оставался постоянным.

Средние значения коэффициентов трения при нагрузках 25 Н и 70 Н находились в диапазоне от 0,63 до 0,79 и от 0,48 до 0,59 соответственно (рис.8а). При высокой нагрузке (70 Н) наблюдается тенденция к снижению коэффициента трения при увеличении концентрации порошка в смеси. Это происходит из-за увеличения концентрации карбида титана, обладающего низкой адгезией к стали.

Износ поверхности уменьшился с 2,5-2,6 мм³/Нм для стали 35 до 0,13-0,39 мм³/Нм для

покрытий (рис.8б). Таким образом, нанесение покрытий позволило повысить износостойкость поверхности стали в 10-20 раз при нагрузке 70 Н, и в 6,3 до 8,5 при 25 Н. При увеличении нагрузки с 25 до 70 Н приведенный износ (мм³/Нм) покрытий снижался для всех образцов. При увеличении нагрузки в 2,8 раза объем износа (мм³) увеличивался лишь на 14-50 %. То есть механизм износа слабо зависит от прилагаемой нагрузки. При обеих нагрузках наибольший износ был у образца А4. Износ образцов А2 и А6 отличается незначительно. То есть максимальные значения износостойкости наблюдаются при максимальной концентрации фазы WC (образец А2) и фазы (W,Ti)C (образец А6) (рис.2).

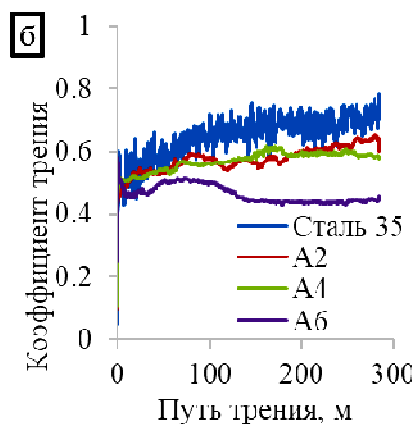
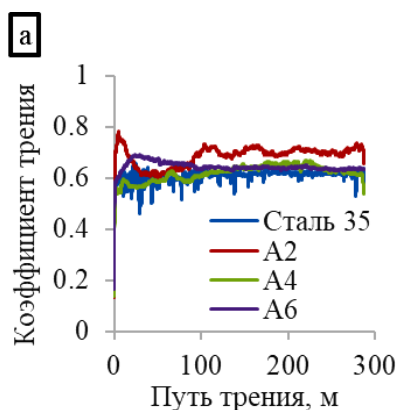


Рис.7. Зависимость коэффициента трения от пути при нагрузке 25 Н (а) и 70 Н (б)

Fig.7. Dependence of the friction coefficient on the path under a load of 25 N (a) and 70 N (b)

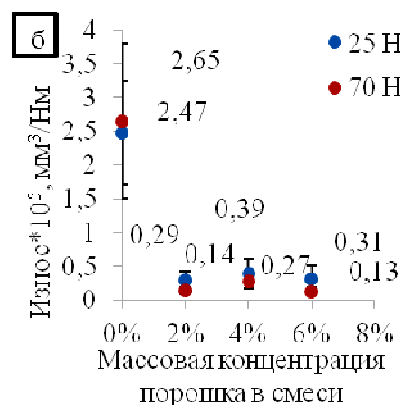
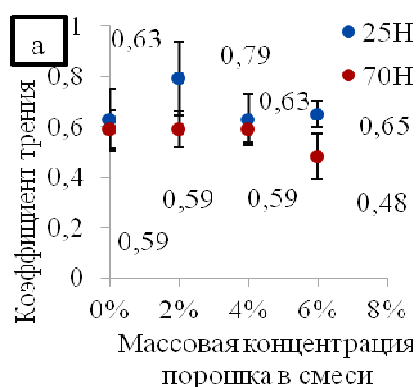


Рис.8. Зависимость коэффициента трения (а) и удельного износа (б) от массовой доли порошка в смеси

Fig.8. Dependence of the friction coefficient (a) and specific wear (b) on the mass fraction of powder in the mixture

Использование ЭЭД для получения порошков из отходов твердых сплавов напрямую и ЭИЛНЭ для нанесения покрытий позволяет

создавать износостойкие покрытия на поверхности деталей различной формы без значительных затрат на оборудование и материалы.

Выводы

Используя метод ЭИЛНЭ и смесь порошка, полученного ЭЭД твердого сплава Т5К10 (2-6 %) и стальных гранул (94-98 %), можно создавать покрытия на конструкционной стали, которые повышают микротвердость в 2,4-3,5 раза и износостойкость в 8,5-20 раз. Порошок, получаемый методом ЭЭД кусков сплава Т5К10 при относительно небольших удельных энергозатратах (4,8 кВтч/кг), состоит из сферических частиц диаметром до 100 мкм и агломератов нанодисперсных частиц. Данные частицы состоят преимущественно из пересыщенного карбида (W,Ti)C, который стабилизировался благодаря высокой скорости охлаждения. Также в порошке имеется 3,8 % свободного углерода образованного в результате пиролиза масла.

Нанесение покрытия происходит со скоростью 1,9-2,6 мг/(см²·мин), которая зависит от концентрации порошка в наносимой смеси. Полученные покрытия состоят преимущественно из фаз WC, α-Fe, (W, Ti)C в различных соотношениях. Увеличение концентрации порошка с 2 % до 6 % в наносимой смеси приводит к увеличению суммарной концентрации W, Ti и Co с 22 % до 50 %. Эти элементы равномерно распределены по глубине покрытий. В фазовом составе при этом увеличивается концентрация фазы (W,Ti)C. Одновременно происходит увеличение микротвердости покрытий с 6,4 до 9,3 ГПа и снижение коэффициента трения с 0,59 до 0,48 при нагрузке 70Н. Нанесение покрытий привело к уменьшению удельного износа поверхности с 2,5-2,6 мм³/Нм для до 0,13-0,39 мм³/Нм. Величина износа слабо зависит от состава покрытий и используемой нагрузки.

Список литературы

1. Zang K., Chen W., Liang W., Miao Q., Yao W. et al. Tribological behaviors of HfC coating prepared on 45 steel via double glow plasma surface metallurgy technique // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2022. V. 74, N 2. P. 228–236.
2. Gao W., Wang S.-C., Hu K.-K., Jiang X.-Z., Yu H.-Y., Sun D.-B. Effect of laser cladding speed on microstructure and properties of titanium alloy coating on low carbon steel // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 451. P. 129029.
3. Bazhin P., Titov N., Zhidovich A., Avdeeva V., Kolomeichenko A., Stolin A. Features of the carbo-vibroarc surfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings

// *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 429. P. 127952.

4. Kumar A., Nayak S.K., Laha T. Comparative study on wear and corrosion behavior of plasma sprayed Fe₇₃Cr₂Si₁₁B₁₁C₃ and Fe₆₃Cr₉P₅B₁₆C₇ metallic glass composite coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. V. 31. P. 1302–1316.

5. Бурков А.А., Быцур А.Ю. Коррозионные свойства и трибологическое поведение покрытий из карбида вольфрама с алюминидной матрицей на нержавеющей стали AISI304 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 4. С. 509–519.

6. Burkov A.A., Pyachin S.A. Formation of WC-Co coating by a novel technique of electro-spark granules deposition // *Materials & Design*. 2015. V. 80. P. 109–115.

7. Коваленко С.В., Козырь А.В., Коневцов Л.А., Коновалов С.В., Крюкова Е.Д. Исследование формирования легированного слоя и его свойств при электроискровом легировании сталей 35 и Х12Ф1 твёрдым и модифицированным твёрдым сплавом // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 1. С. 84–90.

8. Агеева Е.В., Латыпов Р.А., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н. Исследования свойств электроискровых покрытий, полученных электродами из титановых электроэрозионных частиц // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. Т. 23, № 6. С. 21–33.

9. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Изменение состава порошков твердого сплава при электроэрозионном диспергировании в насыпном слое // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019. Т. 15, № 10. С. 478–480.

10. Соловьев В.В., Коновалов С.В., Крюкова Е.Д. Влияние межэлектродной среды на формирование порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования при использовании электродов из титанового сплава // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 2. С. 163–169.

11. Агеев Е.В., Агеева А.Е. Состав, структура и свойства твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием сплава Т5К10 в воде // *Металлург*. 2022. № 2. С. 90–94.

12. Агеев Е.В., Локтионова О.Г., Агеева А.Е., Воскобойников Д.В. Рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы вольфрам-титано-кобальтового сплава, изготовленного искровым плазменным спеканием твердосплавных электроэрозионных порошков, полученных в воде // *Современные материалы, техника и технологии*. 2022. Т. 45, № 6. С. 5–10.

13. Aghajani H., Hadavand E., Peigham-bardoust N.S., Khameneh-asl S. Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel // *Surfaces and Interfaces*. 2020. V. 18. 100392.

14. Катинас Э., Янкаускас В., Казак Н., Михайлов В. Повышение абразивной износостойкости стали Hardox 400 электроискровым легированием поверхности // *Трение и износ*. 2019. Т. 40, № 1. С. 128–135.

15. Dvornik M., Burkov A., Mikhailenko E., Vlasova N., Nikolenko S. et al Influence of liquid composition and discharge energy on process productivity, composition and properties of particles produced by electric discharge erosion of WC–5TiC–10Co alloy // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2023. V. 59, N 2. P. 127–139.

16. Бурков А.А., Пячин С.А., Ершова Т.Б., Власова Н.М., Кириченко Е.А., Зайкова Е.Р. Модифицирование интерметаллидных Ti_3Al электроискровых покрытий карбидами бора, титана и вольфрама // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т. 14, № 2. С. 159–164.

17. Bonache V., Rayón E., Salvador M., Busquets D. Nanoindentation study of WC–12Co hardmetals obtained from nanocrystalline powders: Evaluation of hardness and modulus on individual phases // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. V. 527, N 12. P. 2935–2941.

18. Kresse T., Meinhard D., Bernthaler T., Schneider G. Hardness of WC–Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2018. V. 75. P. 287–293.

19. Wang Y., Zhu D., Jiang X., Sun P. Binderless sub-micron WC consolidated by hot pressing and treated by hot isostatic pressing // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2014. V. 122, N 1425. P. 329–335.

20. Lee K.H., Cha S.I., Kim B.K., Hong S.H. Effect of WC/TiC grain size ratio on microstructure and mechanical properties of WC–TiC–Co cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006. V. 24, N 1–2. P. 109–114.

Информация об авторах

М. И. Дворник – кандидат технических наук Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Е. А. Михайленко – кандидат физико-математических наук Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

А. А. Бурков – кандидат физико-математических наук Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

А. Ю. Быцур – младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

References

1. Zang, K., Chen, W., Liang, W., Miao, Q. & Yao, W. et al. (2022). Tribological behaviors of HfC coating prepared on 45 steel via double glow plasma surface metallurgy technique. *Industrial Lubrication and Tribology*, 74(2), 228–236.

2. Gao, W., Wang, S.-C., Hu, K.-K., Jiang, X.-Z., Yu, H.-Y. & Sun, D.-B. (2022). Effect of laser cladding speed on microstructure and properties of titanium alloy coating on low carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 451, 129029.

3. Bazhin, P., Titov, N., Zhidovich, A., Avdeeva, V., Kolomeichenko, A. & Stolin, A. (2022). Features of the carbo-vibroarc surfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings. *Surface and Coatings Technology*, 429, 127952.

4. Kumar, A., Nayak, S. K. & Laha, T. (2022). Comparative study on wear and corrosion behavior of plasma sprayed $Fe_{73}Cr_2Si_{11}B_{11}C_3$ and $Fe_{63}Cr_9P_5B_{16}C_7$ metallic glass composite coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 1302–1316.

5. Burkov, A. A. & Bytsura, A. Yu. (2022). Korroziionnyye svoystva i tribologicheskoye povedeniye pokrytiy iz karbida vol'frama s alyuminidnoy matritsey na nerzhavayushchey stali AISI304. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(4), 509–519. (In Russ.).

6. Burkov, A. A. & Pyachin, S. A. (2015). Formation of WC–Co coating by a novel technique of electrospark granules deposition. *Materials & Design*, 80, 109–115.

7. Kovalenko, S. V., Kozyr', A. V., Konevtsov, L. A., Kononov, S. V. & Kryukova, E. D. (2019). Issledovaniye formirovaniya legirovannogo sloya i yego svoystv pri elektroiskrovom legirovaniye staley 35 i KH12F1 tvordym i modifitsirovannym tvordym splavom. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16(1), 84–90. (In Russ.).

8. Ageyeva, E. V., Latypov, R. A., Novikov, E. P. & Sabel'nikov, B. N. (2020). Issledovaniya svoystv elektroiskrovnykh pokrytiy, poluchennykh elektrodami iz titanovykh elektroerozionnykh chas-tits. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 23(6), 21–33. (In Russ.).
9. Dvornik, M. I. & Mikhaylenko, E. A. (2019). Izmeneniye sostava poroshkov tverdogo splava pri elektroerozionnom dispergirovani v nasypnom sloye. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 15(10), 478–480. (In Russ.).
10. Solov'yev, V. V., Konovalov, S. V. & Kryukova, E. D. (2019). Vliyaniye mezhelektrodnoy sredy na formirovaniye poroshkovykh materialov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya pri ispol'zovanii elektrodov iz titanovogo splava. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16(2), 163–169. (In Russ.).
11. Ageyev, E. V. & Ageyeva, A. E. (2022). Sostav, struktura i svoystva tverdospлавnykh poroshkov, poluchennykh elektrodispergirovaniyem splava T5K10 v vode. *Metallurg*, (2), 90–94. (In Russ.).
12. Ageyev, E. V., Loktionova, O. G. & Ageyeva, A. E., Voskoboynikov, D. V. (2022). Rentgenospektral'nyy i rentgenostrukturnyy analizy vol'framo-titano-kobal'tovogo splava, izgotovlennogo iskrovym plazmennym spekaniyem tverdospлавnykh elektroerozionnykh poroshkov, poluchennykh v vode. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 45(6), 5–10. (In Russ.).
13. Aghajani, H., Hadavand, E., Peigham-bardoust, N. S. & Khameneh-asl, S. (2020). Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100392.
14. Katinas, E., Yankauskas, V., Kazak, H. & Mikhaylov, V. (2019). Povysheniye abrazivnoy iznosostoykosti stali Hardox 400 elektroiskrovym legirovaniyem poverkhnosti. *Treniye i iznos*, 40(1), 128–135. (In Russ.).
15. Dvornik, M., Burkov, A., Mikhailenko, E., Vlasova, N. & Nikolenko, S. et al. (2023). Influence of liquid composition and discharge energy on process productivity, composition and properties of particles produced by electric discharge erosion of WC–5TiC–10Co alloy. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 59(2), 127–139.
16. Burkov, A. A., Pyachin, S. A., Yershova, T. B., Vlasova, N. M., Kirichenko, E. A. & Zaykova, E. R. (2017). Modifitsirovaniye intermetallidnykh Ti₃Al elektroiskrovnykh pokrytiy karbidami bora, titana i vol'frama. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 14(2), 159–164. (In Russ.).
17. Bonache, V., Rayón, E., Salvador, M. & Busquets, D. (2010). Nanoindentation study of WC–12Co hardmetals obtained from nanocrystalline powders: Evaluation of hardness and modulus on individual phases. *Materials Science and Engineering: A*, 527(12), P. 2935–2941.
18. Kresse, T., Meinhard, D., Bernthaler, T. & Schneider, G. (2018). Hardness of WC–Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 75, 287–293.
19. Wang, Y., Zhu, D., Jiang, X. & Sun, P. (2014). Binderless sub-micron WC consolidated by hot pressing and treated by hot isostatic pressing. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 122(1425), 329–335.
20. Lee, K. H., Cha, S. I., Kim, B. K. & Hong, S. H. (2006). Effect of WC/TiC grain size ratio on microstructure and mechanical properties of WC–TiC–Co cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 24(1–2), 109–114.

Information about the authors

M. I. Dvornik – Candidate of technical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

E. A. Mikhailenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

A. A. Burkov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

A. Yu. Bytsura – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 05.02.2024.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 23; approved after reviewing 18 Jan. 24; accepted for publication 05 Feb. 24.