

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 537.523.4; 544.72

А.А. Бурков, С.А. Пячин, Л.П. Метлицкая, М.А. Пугачевский
(Институт материаловедения Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения РАН)
E-mail: burkovalex@mail.ru

Использование гранул WC–Co сплава для нанесения электроискровых покрытий

Получены упрочняющие электроискровые покрытия на стальной подложке, которая во время нанесения помещалась в контейнер, заполненный крупными частицами твердого сплава ВК8. Исследованы микроструктура, сплошность, шероховатость, микротвердость и износостойкость созданных покрытий. Показано, что характер прохождения разрядных импульсов при осаждении материала отличается от традиционной схемы ЭИЛ, однако формируемое покрытие не уступает по свойствам аналогичным покрытиям. Предлагаемый метод открывает возможности для усовершенствования осаждения электроискрового покрытия на подложку сложной формы.

Ключевые слова: упрочняющие покрытия, электроискровое легирование, карбид вольфрама, микротвердость, износостойкость.

Deposited of hardening electrospark coatings on the steel substrate, which was placed in a container filled with large particles of WC-8%Co. The microstructure, continuity, roughness, microhardness and wear resistance of coatings was investigation. It is shown that the nature of the passage of discharge pulses during the deposition of the material differs from the traditional scheme of electrospark deposition. However, the obtained coating is not inferior to the properties. The proposed method opens up the possibility to automate the process deposition of electrospark coatings, including on substrates of complex shape.

Keywords: hardening Coating, electrospark deposition, tungsten carbides, wear.

Введение

Электроискровое легирование (ЭИЛ) относится к электрофизическим методам обработки, применяемым для повышения прочности и коррозионной стойкости поверхностей металлов и сплавов [1]. Сущность метода ЭИЛ состоит в формировании модифицированного поверхностного слоя на поверхности подложки (катода) за счет переноса материала с легирующего электрода (анода) при многократно повторяющихся электрических разрядах. Толщина электроискровых покрытий может достигать 100 мкм и более, а сами покрытия обладают высокой адгезией с материалом подложки.

В настоящее время для нанесения покрытий используются электроискровые установки с ручным вибратором [2], механизированные установки с вращающимся или возвратно-поступательным приводом [3], а также роботизированные установки, работающие по заданной программе с контролем параметров

разрядных импульсов и перемещения электродов [4]. Поскольку напряжение между анодом и катодом, как правило, не превышает 200 В, самостоятельного пробоя воздушного промежутка не происходит и необходимо устройство для инициирования электрических разрядов. Для этих целей обычно применяется механизм, который качает или вращает анод для осуществления короткого замыкания электродов, либо подается начальный пробойный импульс высокого напряжения, что снижает электробезопасность установки.

Другая проблема связана с тем, что область воздействия разрядов ограничена размерами анода. Для равномерной обработки большой площади требуется перемещать легирующий электрод с постоянной скоростью и покрывать поверхность за несколько проходов в зависимости от заданной толщины. Отсюда невысокая производительность и трудность осаждения покрытий на подложку сложной формы, особенно при использовании механизированных установок, в

которых требуется задавать траекторию анода. Для увеличения скорости осаждения можно было бы использовать одновременно несколько легирующих электродов, скрепленных вместе, однако в этом случае помимо повышения мощности генератора необходимо было бы использовать дополнительный электронный блок для равномерного распределения импульсов тока между электродами.

В работе предложено вместо анода в форме стержня использовать крупные частицы осаждаемого материала, помещенные в контейнер, а подложку-катод помещать внутрь этого контейнера. Такая схема обеспечивает многоточечный контакт дисперсного материала со всеми сторонами подложки, и поэтому разряды могут развиваться в нескольких местах одновременно. Замена металлического стержня на крупные частицы не меняет физической сущности процессов при электроискровом воздействии, при этом модифицированный поверхностный слой на катоде формируется по аналогичному механизму "плавление-перенос-перемешивание-кристаллизация".

Цель работы — проведение сравнительных исследований микроструктуры, состава и свойств покрытий, полученных традиционным и усовершенствованным методами электроискрового легирования. В качестве анодного материала использовался вольфрамосодержащий твердый сплав ВК8, который широко применяется в качестве основы упрочняющих покрытий [3, 5, 6].

Материалы и методы проведения исследований

Предлагаемая схема нанесения покрытий близка к процессу электроэрозионного диспергирования материалов в жидкой диэлектрической среде [7] с той лишь разницей, что она проводится в газовой атмосфере, а на обрабатываемую деталь подается отрицательный потенциал. Схема установки изображена на рис. 1. Подложку 1 из стали 35, которая имела форму цилиндра диаметром 12 мм и высотой 10 мм, помещали в металлический контейнер 2, заполненный частицами 3 твердого сплава ВК8 (ГОСТ 3882-74). Контейнер высотой 50 мм, диаметром 35 мм и толщиной стенки 2 мм был изготовлен из стали 45. Его устанавливали на вибростол 4. Между контейнером и платформой помещали изолятор 7. Для снижения окисления поверхности образцов в рабочий объем контейнера из баллона 9 подавали защитный газ — аргон.

Образец, на который необходимо было нанести покрытие, закрепляли на тонкий стальной стержень и подвешивали к держателю 5, подключенному к отрицательному выводу генератора импульсов 9. Положительный вывод генератора присоединяли к контейнеру. Для определения тока разрядов и напряже-

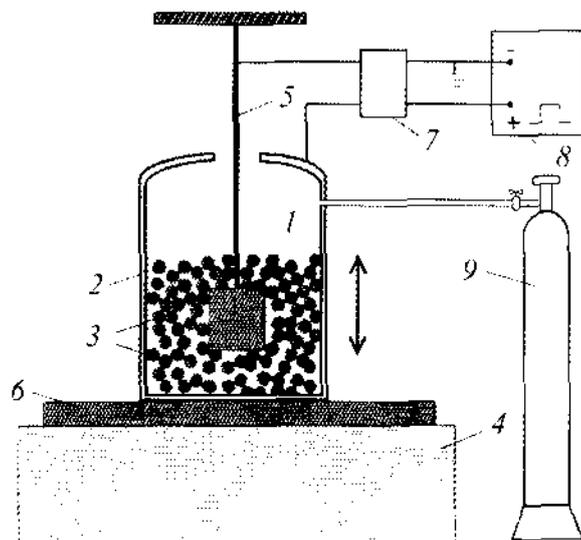


Рис. 1. Схемы электроискрового осаждения покрытий гранулированным материалом:

1 — подложка; 2 — контейнер; 3 — частицы; 4 — вибростол; 5 — держатель катода; 6 — изолятор; 7 — измерительное устройство; 8 — генератор импульсов; 9 — баллон с аргонном

ния на межэлектродном промежутке использовали измерительное устройство 8.

Падение напряжения на межэлектродном промежутке замеряли с помощью делителя, включенного между катодом и анодом. Текущее значение тока рассчитывали по напряжению на сопротивлении 0,075 Ом, включенном последовательно в токоподводящую цепь. Регистрацию сигналов осуществляли с помощью аналого-цифрового 12-разрядного преобразователя (L-Card E20-10), данные с которого передавали на персональный компьютер. Максимальная частота дискретизации АЦП — 10 МГц на канал.

В экспериментах использовали две фракции гранул твердого сплава ВК8 с различными размерами (табл. 1). Частицы имели округлые края. Обозначение

Таблица 1

Характеристики наносимого материала

Обозначение образца	Химический состав, %	Форма	Размеры, мм
ГР8	WC-92 + Co-8	Гранулы	4,5...8,0
ГР4	WC-92 + Co-8	Гранулы	1,6...4,5
СТ	WC-92 + Co-8	Брусочек	35x5x5

ния наносимого материала и покрытия, полученного с его использованием, одинаковые. При использовании частиц твердого сплава с диаметром менее 1 мм в качестве насыпного материала не удавалось создать покрытия удовлетворительного качества. Причина таких неудачных опытов заключалась в том, что основная выделяемая мощность рассеивалась на частицах, а не в области контакта с подложкой. Это приводило к сплавлению частиц между собой и слабому их сцеплению со стальным катодом.

Во время нанесения подложка оставалась неподвижной, а контейнер с частицами, установленный на вибростолик, качался в вертикальном направлении с частотой 50 Гц и амплитудой 1 мм. От генератора подавались импульсы тока частотой (f) 100 Гц и длительностью (τ) 1 мс. За счет вибрации контейнера частицы смещались относительно поверхности подложки и в моменты прерывания их контакта инициировались электрические разряды. Амплитуда тока достигала 110 А при межэлектродном напряжении 30 В. Полное время осаждения составляло 10 мин. Каждые 2 мин обработку прерывали и определяли изменение масс катода и гранул с помощью электронных весов "Shinko НТК-220СЕ" с точностью 0,1 мг. Кроме того, для сравнения были нанесены упрочняющие покрытия по традиционной схеме стержень — плоскость при аналогичных энергетических параметрах (см. табл. 1, образец № 3) с использованием ручного вибратора. Все покрытия были получены в атмосфере аргона для предотвращения выгорания углерода.

Металлографические исследования выполняли с использованием оптического микроскопа "МИМ-10". Кроме того, для изучения микроструктуры покрытий применяли сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) в режиме фазового контраста. Микронзондовый элементный анализ проводили с использованием электронного микроскопа "EVO 40HV", оснащенного энергодисперсионным спектрометром "INCA ENERGY 350". Фазовый состав полученных образцов изучали на рентгеновском дифрактометре "ДРОН-7" в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Микротвердость по Виккерсу измеряли при помощи микротвердомера "ПМТ-3М" при нагрузке 0,5 Н. Абразивную износостойкость покрытий определяли на трибометре "CALOTEST" (CSM Instruments) по схеме шар — плоскость. В качестве абразивного материала использовали суспензию Al_2O_3 в соляровом масле МС20. Во время испытания шар диаметром 30 мм вращался с линейной скоростью 0,27 м/с. Для исследования шероховатости покрытий применяли "Профилометр 296".

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ амплитуды тока, протекающего в процессе электроискрового осаждения в насыпной среде, по-

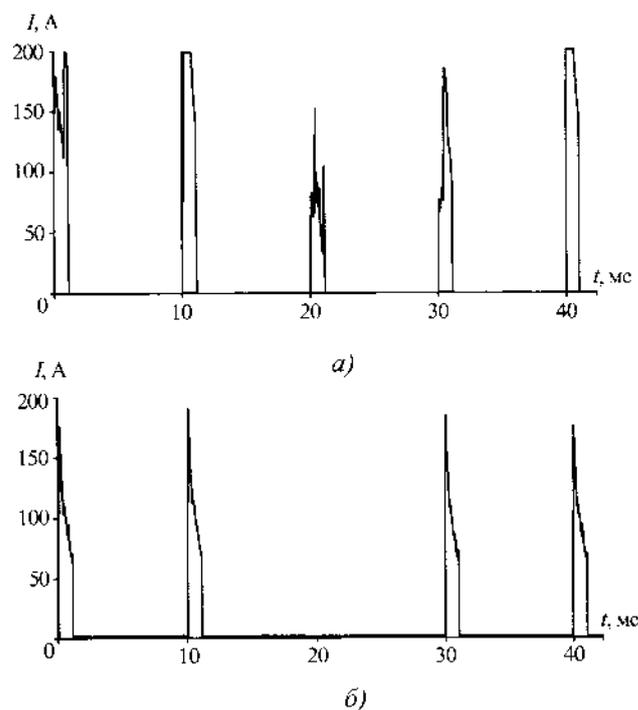


Рис. 2. Форма импульсов тока при электроискровом осаждении по схеме:

a — порошок — плоскость; *б* — стержень — плоскость

казал, что число разрядов соответствовало числу импульсов задающего генератора, т.е. отсутствовали пропуски, которые наблюдались при использовании анода в форме стержня (рис. 2). Однако формы импульсов для разных способов осаждения отличались. Если при традиционной схеме ЭИЛ разрядные импульсы, как правило, имели экспоненциально-спадающую форму, то в среде гранул каждый отдельный импульс продолжительностью 1 мс представлял собой совокупность мелких выбросов тока с различной амплитудой и длительностью менее 50 мкс. Это время, по всей видимости, характеризует продолжительность электрического контакта крупной частицы с подложкой, который разрывается за счет отбрасывания частицы под действием давления в разрядном канале. Кроме того, частицы при вибрации смешались, поэтому менялось электросопротивление цепи, зависящее от размеров и количества частиц, через которые проходил ток. В результате этого амплитуда разрядного тока была нестабильна, что проявлялось в изменении размеров области воздействия разрядов.

На рис. 3 представлены распределения диаметров электроэрозионных кратеров, наблюдаемых на поверхности образцов ГР8 и ГР4 после воздействия разрядов. Видно, что диаметры эрозионных лунок находятся в широком диапазоне 10...600 мкм, однако их большая часть имеет размер 50...200 мкм. При ис-

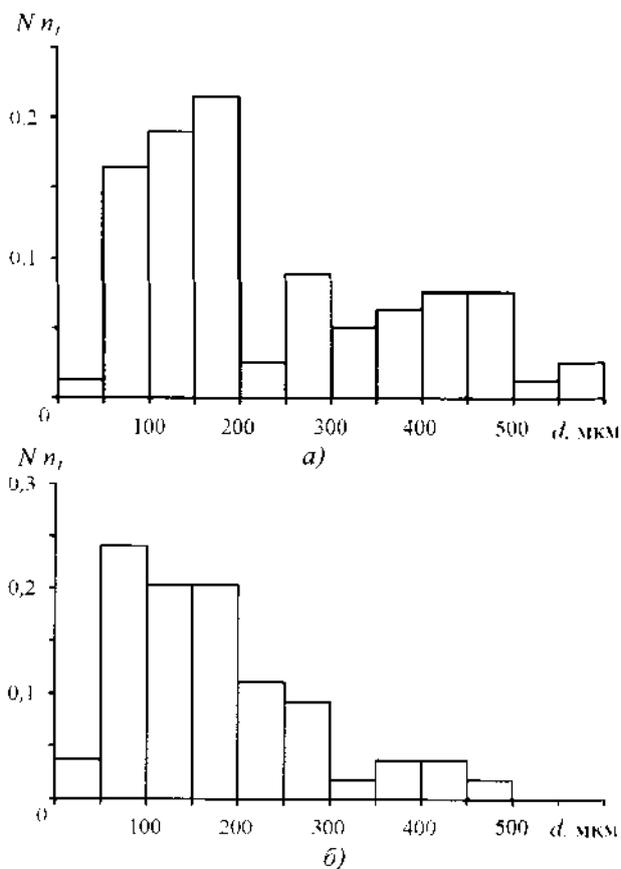


Рис. 3. Распределение диаметра эрозионных лунок на поверхности катода: а – ГР8; б – ГР4

пользовании гранул с меньшим диаметром максимум распределения незначительно смещается в область малых размеров. Примечательно, что если сравнивать эти значения с предварительно снятой зависимостью диаметра кратера от длительности разрядов для схемы шар – плоскость

$$d(\text{мм}) = 0,129 \ln(\tau) + 0,922 \text{ (для } \tau > 1 \text{ мкс),}$$

то они будут соответствовать $\tau \approx 1...4$ мкс. При такой длительности выделяющаяся при разряде энергия не превышает 4 мДж, поэтому количество расплавленного материала за единичный акт искрового воздействия незначительно, что может проявиться в снижении толщины наносимого слоя [5]. Кратеры с максимальным диаметром соответствуют длительности 40 мкс, которая близка к продолжительности выбросов, наблюдаемых при осциллографировании.

Кинетические зависимости изменения общей массы WC-Co гранул и массы стального катода при электроискровом осаждении представлены на рис. 4. Видно, что с ростом времени обработки масса частиц снижалась, а масса катода увеличивалась, что обусловлено переносом твердого сплава на поверхность

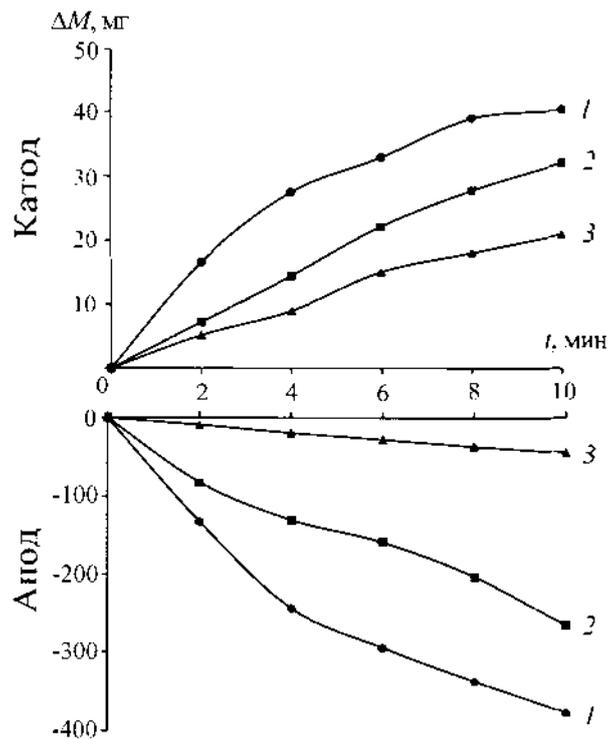


Рис. 4. Изменение массы катодов в зависимости от времени электроискровой обработки: 1 – ГР8; 2 – ГР4; 3 – СТ

стальной подложки. Электроэрозия частиц и привес катода для образцов ГР8 были примерно в 1,5 раза больше, чем для ГР4. При создании покрытий с применением анода в форме стержня при тех же параметрах разрядов ($f = 1$ кГц, $\tau = 1$ мс) скорость возрастания массы катода была в 2 раза выше, чем при гранулированном материале, однако качество осаждаемого слоя было неудовлетворительное из-за прижогов и грубой шероховатости. Когда длительность разрядов была снижена до 50 мкс, скорость привеса катода уменьшилась (см. линия 3 на рис. 4).

Также было замечено, что в случае осаждения в насыпном материале коэффициент переноса вещества, определяемый как отношение массы катода к массе анода, составил в среднем $0,11 \pm 0,01$ вне зависимости от размера гранул. При обычной схеме ЭИЛ он равен примерно $0,5 \pm 0,2$. Такое расхождение объясняется тем, что разряды возникают не только возле поверхности катода, но и в областях контакта частиц. Это приводит к тому, что эродированный материал не осаждается на поверхности катода, а осыпается на дно контейнера.

Внешний вид поверхности покрытий ГР8 и ГР4 практически не отличается от покрытия, полученного по стандартной схеме ЭИЛ (рис. 5, а). Неравно-

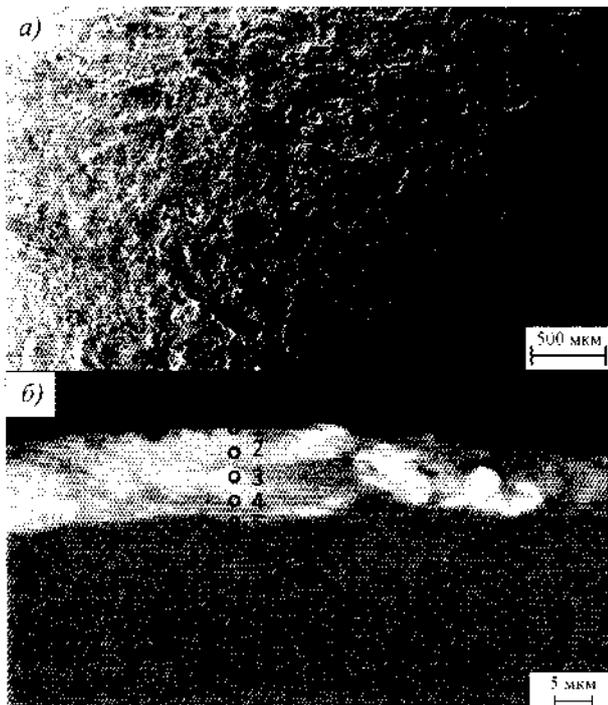


Рис. 5. СЭМ – изображения поверхности (а) и поперечного сечения электрохромного покрытия (б) GP8

мерный рельеф осажденного слоя обусловлен наложением лунок, заполненных застывшим расплавленным металлом. Покрытия неоднородны по глубине. На растровых электронных изображениях поперечных сечений покрытий отчетливо проявляются области с разной плотностью (рис. 5, б). На основе анализа элементного состава различных участков (табл. 2) было сделано заключение, что покрытие со-

Таблица 2

Элементный состав различных участков покрытия GP8

Точка (рис. 6, б)	Концентрация элементов, % ат.			
	C	W	Co	Fe
1	43	36	5	16
2	41	34	5	20
3	36	34	5	25
4	32	37	5	26
5	29	15	–	56
6	26	1	–	73
7	20	–	–	80

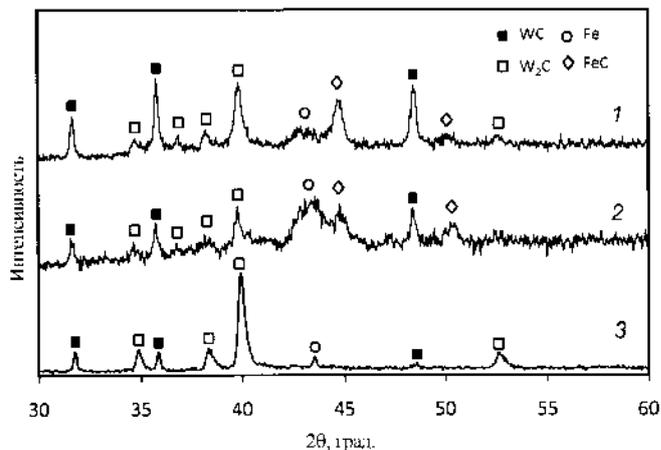


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы покрытий: 1 – GP8; 2 – GP4; 3 – СТ

стоит из зерен карбида вольфрама (светлые области), распределенных в матрице железа и кобальта. На рентгенодифракционных спектрах полученных покрытий присутствуют линии, соответствующие карбидам WC, W₂C и FeC (рис. 6).

Карбид железа и субкарбид вольфрама образуются в результате декарбидизации WC при его взаимодействии с расплавленным железом подложки [8]. Содержание карбидов WC и W₂C в образцах GP8 и GP4 примерно одинаковые, а в покрытии СТ фазы W₂C больше. Это объясняется тем, что при нанесении покрытий в насыщенной среде длительность единичного акта электроразрядного воздействия гораздо меньше, чем при стержне, и с ростом длительности разрядного импульса обезуглероживание WC возрастает, как было показано нами ранее [9]. Концентрация железа по глубине покрытия увеличивается, а содержание углерода снижается.

Характерно, что в слоях подложки, прилегающих к покрытию, концентрация углерода выше, чем в ее объеме, что объясняется диффузией углерода из покрытия в сталь. При травлении стали в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте выявляется ферритно-перлитная структура стали, возникшая в результате термического воздействия и быстрого охлаждения металла.

В табл. 3 представлены основные характеристики WC–Co-покрытий, осажденных на сталь 35. Площадь покрытий GP8 и GP4 составляла 93...98 %. Их средняя толщина варьировалась в пределах от 14 до 23 мкм. Микротвердость покрытий более чем в 4 раза превышает микротвердость стали 35. Параметр шероховатости Ra не зависит от размера гранул и составляет 3...4 мкм, что сопоставимо с шероховатостью покрытий, формируемых при традиционной схеме ЭИЛ [9]. Испытания покрытий на микроабразивный износ

Таблица 3

Характеристики полученных покрытий

Образец	ГР8	ГР4	СТ
Сплошность, %	98,5	93,4	99,1
Параметр шероховатости R_a , мкм	3,4	3,1	2,2
Средняя толщина, мкм	23	19	14
Микротвердость, ГПа	8,9	8,7	9,0
Износ**, $10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$	1,37	1,59	4,27

* Микротвердость стальной подложки – 2,18 ГПа.
 ** Износ стали 35 – $17,71 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$.

показали, что нанесение покрытий на стальную подложку позволяет в 10 раз повысить ее износостойкость. Также было установлено, что скорость износа образца СТ более чем в 2,5 раза выше, по сравнению с образцами ГР8 и ГР4. Отличие в износостойкости образцов обусловлено различной концентрацией WC в покрытиях данных образцов из-за малой длительности разрядного воздействия.

Результаты проведенных исследований показывают возможность создания электроискровых покрытий в насыпной среде для упрочнения металлов и сплавов, особенно для деталей сложной формы. С целью поиска способов повышения толщины покрытия необходимо провести дополнительные исследования.

Выводы

Предложен модифицированный метод электроискрового осаждения твердосплавных покрытий с использованием гранул ВК8 в качестве анода. Данный метод позволяет создавать покрытия толщиной в несколько десятков микрометров, повышающие микротвердость стали в 4 раза и износостойкость – в 10 раз.

Скорость износа полученных покрытий в 2,5 раза ниже по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной схеме ЭИЛ, что объясняется более высоким содержанием в них карбида вольфрама WC.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lazarenko N.I. Electrospark Alloying of Metal Surfaces // Engineering Industry. 1967. P. 17.
2. Luo C., Dong S., Xiong X., Zhou N. Mass loss of copper alloy electrode during TiB_2 coating by electrospark deposition // Surface and Coatings Technology. 2009. V. 203. P. 3333–3337.
3. Николенко С.В., Бурков А.А. Некоторые аспекты механизированного электроискрового легирования стали вращающимся торцевым электродом твердыми сплавами с различной частотой и длительностью электрических импульсов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 5. С. 21–27.
4. Frangini S., Masci A. A study on the effect of a dynamic contact force control for improving electrospark coating properties // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 204. P. 2613–2623.
5. Ribalko A.V., Sahin O. A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloy // Surface and Coatings Technology. 2006. V. 201. P. 1724–1730.
6. Wang R., Qian Yu., Liu J. Interface behavior study of WC92–Co8 coating produced by electrospark deposition // Applied Surface Science. 2005. V. 240. P. 42–47.
7. Дворник М.И., Верхотуров А.Д. Переработка вольфрамкобальтового твердого сплава электроэрозионным диспергированием в воде с последующей карбидизацией. // Порошковая металлургия. 2008. № 7/8. С. 137–145.
8. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC–Co electrodes / E.I. Zamulacva, E.A. Levashov, A.E. Kudryashov, P.V. Vakaev, M.I. Petrzhih Deposition process, structure, and properties // Surface and Coatings Technology. 2008. V. 202. P. 3715.
9. Николенко С.В., Пячин С.А., Бурков А.А. Формирование электроискровых покрытий из твердого сплава ВК8 с добавкой Al_2O_3 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2011. № 1. С. 58–62.

Авторы благодарят А.В. Зайцева, С.Н. Химухина, С.В. Николенко за помощь в реализации экспериментов и обсуждении результатов исследований. Работа выполнена в рамках соглашения № 8687 от 21.09.12 г. согласно реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы" по теме "Наноструктурные материалы и покрытия на основе карбидных и оксидных систем: получение и свойства".

