

**В. И. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, **Ф. Х. БУРУМКУЛОВ**, д-р техн. наук  
(Всероссийский научно-исследовательский институт ремонта  
и эксплуатации машинно-тракторного парка РАСХН),  
**А. Д. ВЕРХОТУРОВ**, д-р техн. наук  
(Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск),  
**П. С. ГОРДИЕНКО**, д-р техн. наук, **Е. С. ПАНИН**, канд. хим. наук  
(Институт химии ДВО РАН, Владивосток),  
**Л. А. КОНЕВЦОВ**, канд. техн. наук  
(Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН, Хабаровск)  
E-mail: [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)

## Формирование поверхностного слоя низкоуглеродистой стали при электроискровой обработке

Приведены результаты исследований морфологии, элементного и фазового составов поверхностных слоев, полученных электроискровой обработкой в газовой среде стали Ст10 металлокерамическим твердым сплавом ВК8.

The research results of the morphology, elemental and phase composition of surface layers performed by electrical discharge treatment in the gaseous atmosphere of the steel Ст10 by ceramic-metal hard alloy ВК8 are given.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, удельное время, частота вибрации, поверхностный слой, структура, эрозия, свойства

**Key words:** electric discharge alloying, specific time, vibration frequency, surface layer, structure, erosion, properties

### ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях производства — добыче и переработке природных ресурсов, машино- и приборостроении, сельском хозяйстве, транспорте и др. — для улучшения эксплуатационных характеристик и повышения ресурса быстроизнашиваемых деталей широко применяют методы нанесения износостойких покрытий дорогостоящими энергозатратными и экологически небезопасными методами химического и физического осаждения. Для этих же целей все большее применение находит экологически безопасный метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который позволяет получать покрытия на различных токопроводящих материалах, в том числе на тугоплавких металлах, а также на композиционных материалах с использованием минерального сырья [1]. Метод прост в технической реализации, обладает малой энергоемкостью, установки для ЭИЛ имеют сравнительно небольшую массу и успешно "встраиваются" в технологический процесс получения материалов, восстановления им упрочнения деталей, что особенно важно для ремонтного производства. Однако формирование покрытий

требует систематических исследований процесса формообразования легированного слоя (ЛС), его фазового и химического составов. В научно-технической литературе [2, 3 и др.] имеются отдельные несистематизированные данные по этим вопросам, что не позволяет осуществлять целенаправленный поиск энергетических данных по получению покрытий заданного состава и структуры.

Цель данной работы — систематизированные исследования морфологии, структуры, фазового и химического составов электроискровых покрытий металлокерамическим твердым сплавом ВК8 подложки из стали Ст10 (ВК8/Ст10) с применением современных методов исследования.

### Методика проведения исследований

Исследования выполняли на электроискровом комплексе БИГ-1, состоящем из модернизированной установки Элитрон-22АМ и высокочастотного блока АГ-2.

Для экспериментальной работы был выбран энергетический режим установки с энергией импульсов  $E = 0,14$  Дж и три частотных режима ра-

боты вибровозбудителя (100, 250 и 400 Гц), при которых значения рабочего тока составляли 0,8, 1,0 и 1,2 А соответственно. Режимы с частотой  $f$ , равной 250 и 400 Гц, обеспечивались высокочастотным блоком. В качестве образцов использовали пластинки толщиной 2 мм из низкоуглеродистой конструкционной стали Ст10 с площадью обработки  $2 \text{ см}^2$ . Данная марка стали отличается высокой пластичностью при невысокой прочности сердцевин, широко применяется в промышленности. Она выбрана с учетом низкого содержания углерода, при котором его влияние на характеристики покрытий минимально. Электродом служил стержень диаметром 4 мм из металлокерамического твердого сплава ВК8.

Исследовали ЭИЛ [4] для определения при указанных электрических параметрах режима минимального удельного времени обработки  $\tau$ , при котором поверхность равномерно обрабатывалась до полного изменения рельефа, т. е. до полного исключения участков с исходным рельефом. Последнее контролировали осмотром поверхности с использованием лупы семикратного увеличения. Значения  $\tau$  для частот 100, 250 и 400 Гц составляли соответственно 65, 45 и 40 с/см<sup>2</sup>. В дальнейшем ЭИЛ (ВК8/Ст10) выполняли при  $\tau$ ,  $3\tau$ ,  $5\tau$ ,  $7\tau$ ,  $10\tau$  и  $15\tau$ .

Толщину нанесенного слоя покрытия измеряли микрометром, изменение массы образцов и электрода определяли взвешиванием на аналитических весах ВЛО-200г.

Для исследования химического и фазового составов поверхностей применяли дифрактометр D8 ADVANCE, микроанализатор WDS/EDS JXA-8100, сканирующий электронный микроскоп EVO-50XVP. Рентгенограммы образцов снимали по методу Брегг-Брентано с вращением образца в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении ( $U = 30 \text{ кВ}$ ,  $I = 30 \text{ мА}$ ), рентгенограммы получали непосредственно с его поверхности. При выполнении рентгенофазового анализа использовали программу поиска EVA с банком данных PDF-2. Идентификацию экспериментальных данных выполняли с учетом дифракционных отражений. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20—35 кВ, токе 40 мА (диаметр пучка 1 мкм). Для анализируемых элементов минимальный предел обнаружения не превышал 0,1 %.

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 и на рис. 1, 2 приведены результаты систематизированных исследований изменения толщины образцов  $\Delta_n$ , массы катода  $\Delta_k$ , эрозии материала легирующего электрода  $\Delta_a$ , коэффициента массопереноса  $K_n$  в зависимости от удельного времени обработки  $\tau_0$  и ее режимов при ЭИЛ ВК8/Ст10.

Видно, что удельное время ЭИЛ уменьшается с повышением рабочего тока и частоты вибрации электрода. Это можно выразить функциональной зависимостью

$$\tau_0 = f(k/I_p; f_B), \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Таблица 1

Номер образца	Рабочий ток, А	Частота $f_B$ , Гц	Удельное время $\tau_0$ , с/см <sup>2</sup>	$\Delta_n$ , мм	$\Delta_k$ , г/см <sup>2</sup>	$\Delta_a$ , г/см <sup>2</sup>	Коэффициент $K_n = \Delta_k/\Delta_a$ , %
1	0,8	100	$\tau = 65$	0,01	0,0042	-0,0065	64,6
2			$3\tau = 195$	-0,01	0,0055	-0,0085	64,7
3			$5\tau = 325$	-0,01	0,0080	-0,0130	61,5
4			$7\tau = 455$	0,01	0,0110	-0,0155	71,0
5			$10\tau = 650$	0,01	0,0135	-0,0170	79,4
6			$15\tau = 975$	0,02	0,0175	-0,0285	61,4
7	1,0	250	$\tau = 45$	0,01	0,0027	-0,0035	77,1
8			$3\tau = 135$	0,01	0,0040	-0,0055	72,7
9			$5\tau = 225$	0	0,0063	-0,0080	78,7
10			$7\tau = 315$	0,02	0,0080	-0,0120	66,7
11			$10\tau = 450$	0,01	0,0100	-0,0172	58,1
12			$15\tau = 675$	0,01	0,0155	-0,0218	71,1
13	1,2	400	$\tau = 40$	0,01	0,0023	-0,0038	60,5
14			$3\tau = 120$	0,01	0,0038	-0,0065	58,5
15			$5\tau = 200$	0,01	0,0055	-0,0081	67,9
16			$7\tau = 280$	0	0,0070	-0,0099	70,7
17			$10\tau = 400$	0	0,0086	-0,0126	68,2
18			$15\tau = 600$	0	0,0093	-0,0140	66,4



Согласно данным рис. 2, при ЭИЛ с энергией импульсов  $E = 0,14$  Дж повышение удельного времени обработки  $\tau_{\text{и}}$  ведет к увеличению массы катода  $\Delta_k$  и эрозии электрода  $\Delta_a$ , т. е.

$$\Delta_k = f[(k_1 \tau_{\text{и}}), k_2(I_p; f_B)]; \quad (2)$$

$$\Delta_a = f[(k_3 \tau_{\text{и}}), k_4(I_p; f_B)], \quad (3)$$

где коэффициенты  $k_1 \geq 1$  и  $k_3 \geq 1$ , но  $k_2 < 1$  и  $k_4 < 1$ .

Эти зависимости согласуются с выводами работы [5]. При этом наблюдаются (см. рис. 2) сравнительно высокие значения  $K_{\text{п}}$ , которые достигают 80 %. Это связано с тем, что при ЭИЛ на "мягких" режимах ( $E = 0,14$  Дж) эрозия анода про-

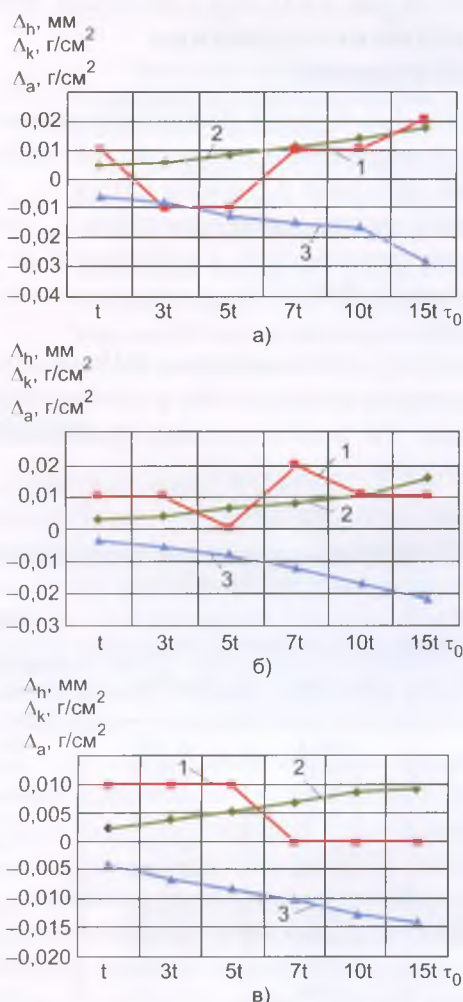


Рис. 1. Зависимости толщины нанесенного слоя (1), удельного прироста массы образца (2) и удельного расхода электродного материала (3) от удельного времени обработки стали Ст10 твердым сплавом ВК8 на установке БИГ-1 при частоте вибрации электрода 100 (а), 250 (б) и 400 (в) Гц: а —  $E = 0,14$  Дж,  $I = 0,8$  А, условное удельное время обработки  $t = 65$  с/см<sup>2</sup>; б —  $0,14$  Дж,  $1,0$  А,  $45$  с/см<sup>2</sup>; в —  $0,14$  Дж,  $1,2$  А,  $40$  с/см<sup>2</sup>

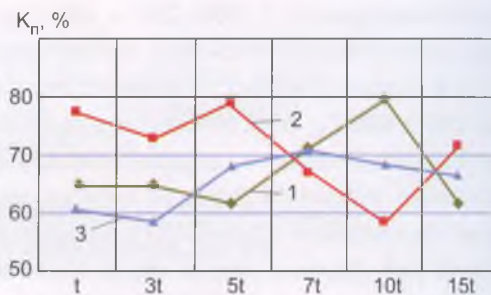


Рис. 2. Зависимость  $K_{\text{п}}$  электродного материала от  $\tau_{\text{и}}$  на установке БИГ-1 стали Ст10 твердым сплавом ВК8 при частоте вибрации электрода 100 (1), 250 (2) и 400 (3) Гц: 1—3 —  $t$  равно соответственно 65, 45 и 40 с/см<sup>2</sup>

исходит преимущественно в жидкой и паровой фазах, что способствует повышению  $K_{\text{п}}$ .

Следует отметить отсутствие приращения толщины легированных образцов (№ 9, 16—18) или даже уменьшение их толщины (№ 2, 3). Эти данные могут быть истолкованы как полное разрушение слоя и даже поверхности образца вместе с ЛС. Однако это не означает отсутствия ЛС на поверхности упрочняемых образцов, что не подтверждается рентгенофазовым анализом (РФА), а также исследованиями элементного состава (табл. 2) и микроструктуры и распределения по поверхности образца.

Так, по данным химического состава в поверхностном слое образца № 2 ( $\tau_{\text{и}} = 195$  с/см<sup>2</sup>) содержатся W, Co, O, C. Еще в большем количестве эти элементы содержатся в поверхностном слое образца № 3 (см. табл. 2), в котором обнаруживаются фазы, как и у образца № 1: Fe (куб.); CoO (куб.); W<sub>2</sub>C (гекс.); WC (гекс.); WC<sub>1-x</sub> (куб.), при исходном обнаружении фаз до ЭИЛ у анода: Fe (куб.) и у катода: Co (гекс.); Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (куб.); CoO (куб.); WC (гекс.). Аналогичные результаты исследований химического состава поверхности наблюдаются после ЭИЛ образцов № 9, 17, 18. Следовательно, отрицательные значения изменения толщины ЛС образцов  $\Delta_{\text{п}}$  или отсутствие их приращения после ЭИЛ не являются следствием отсутствия ЛС.

Согласно данным табл. 2, при обработке в поверхностном слое содержатся: 26,2—70,6 % W, 2,4—6,5 % Co, 8,5—18,4 % C и 7,2—59,5 % Fe. Следовательно, ЛС представляет композиционный материал, состоящий из материала анода и катода. Его формирование происходит за счет взаимной кристаллизации перенесенного с анода материала и расплавленного материала катода либо расплавленного материала анода с мате-

риалом поверхности катода ("вторичной" структурой). Установлено также наличие в ЛС кислорода от 2,1 до 5,9 %, что объясняется ЭИЛ ВК8/Ст10 на воздухе.

При ЭИЛ твердым сплавом подложки из стали Ст10 (ВК8/Ст10) происходит эрозия материала не только анода, но и катода. Хотя эрозия последнего на порядок меньше [2], ее необходимо учитывать при измерении толщины покрытия с помощью механических устройств. В связи с этим действительная толщина покрытия больше измеряемой толщины на величину эрозии материала катода:

$$h_d = h_n + h(\Delta_3^k), \quad (4)$$

где  $h_d$  — действительное значение толщины покрытия;  $h_n$  — измеренное значение толщины образца;  $h(\Delta_3^k)$  — толщина слоя, полученная за счет эрозии материала катода, при "чистовых" режимах обработки в некоторых случаях  $h(\Delta_3^k) \geq h_n$ .

Кроме того, при ЭИЛ ВК8/Ст10 образуются островки перенесенного материала, которые при последующем ЭИЛ частично удаляются, что приводит к уменьшению толщины образца.

При небольших значениях  $\tau_n$  образуются островки размером до 0,1—0,8 мм, при этом содержание Fe в исследованных спектрах несколько больше содержания W. При повышении времени обработки (до 325 с/см<sup>2</sup>) происходит заполнение поверхности образца между островками, при этом резко увеличивается содержание W и уменьшается содержание материала подложки.

При дальнейшем повышении  $\tau_n$  до 455 с/см<sup>2</sup> происходит стабилизация в формировании ЛС:

содержание W, Fe, Co, O отличается незначительно с повышением  $\tau_n$  (до 650 с/см<sup>2</sup>). Количество островков и их размеры уменьшаются в связи с заполнением переносимым материалом областей поверхности между ними, количество W в поверхностном слое увеличивается, а содержание Fe в ЛС значительно уменьшается. При этом рентгенофазовый анализ, начиная с образца № 3, показывает наличие в поверхностном слое следующих фаз: CoO (куб.); W (куб.); W<sub>2</sub>C (гекс.); WC (гекс.); WC<sub>1-x</sub> (куб.).

Таким образом, на поверхности в процессе ЭИЛ ВК8/Ст10 формируется композиционный ЛС, состоящий в самом начале из отдельных участков, островков перенесенного материала на свободной поверхности катода, которая постепенно заполняется материалом подложки  $M_n$  с образованием композита  $M_a + M_k$ .

Дальнейшее повышение  $\tau_n$  (до 975 с/см<sup>2</sup>) приводит практически к образованию ЛС без видимых островков с большим содержанием вольфрама (до 70,6 %) и наименьшим Fe (7,2 %). Однако в связи с особенностями технологии ЭИЛ ВК8/Ст10 и, в частности, влиянием стохастического характера процесса воздействия электроискрового разряда на единицу площади катода формирование ЛС на всей его площади может быть неравномерным. Таким образом, будет происходить образование композита не только по глубине поверхностного слоя, но и постепенным заполнением "межостровковой" площади, что обычно способствует повышению работоспособности формируемого ЛС [6].

Таблица 2

Номер образца	Fe, %/ат.%	W, %/ат.%	Co, %/ат.%	O, %/ат.%	C, %/ат.%	$\tau$ , с
1	57,0/44,9	26,2/6,3	2,4/1,8	3,2/8,7	9,8/36,0	65
2	42,0/36,6	40,4/10,7	3,5/2,9	4,0/12,3	8,5/34,7	195
3	20,1/18,1	58,6/16,0	5,1/4,3	3,4/10,7	11,6/48,6	325
4	23,1/20,8	55,8/15,2	5,4/4,6	3,4/10,7	11,1/46,5	455
5	14,1/10,8	58,7/13,7	5,2/3,8	4,6/12,4	16,2/57,7	650
6	7,2/6,8	70,6/20,3	6,5/5,8	2,1/7,1	13,6/60,0	975
7	42,1/25,9	29,5/5,5	2,5/1,5	5,9/12,7	18,4/52,5	45
8	37,9/32,2	42,5/11,0	4,1/3,3	4,2/12,3	9,7/38,3	135
9	35,8/30,1	44,6/11,4	4,1/3,3	3,3/9,8	11,2/43,8	225
10	24,3/18,5	51,3/11,8	4,2/3,0	3,8/10,0	15,7/55,4	315
11	25,1/22,0	53,2/14,2	4,9/4,1	2,5/7,8	12,4/50,8	450
12	12,9/11,3	64,4/17,1	5,5/4,5	2,9/9,0	14,3/58,1	675
13	59,5/46,9	26,4/6,3	—	3,4/9,4	10,5/36,9	40
14	40,6/35,6	42,5/11,3	3,5/2,9	2,8/8,6	9,8/40,0	120
15	29,6/28,0	53,0/15,2	4,1/2,0	2,8/9,3	9,5/41,8	200
16	32,1/30,0	51,3/14,6	3,6/3,2	2,5/8,1	9,8/42,8	280
17	36,2/33,9	47,7/13,6	3,6/3,2	3,1/10,3	8,7/37,3	400
18	24,7/21,4	55,5/14,6	3,4/3,1	3,5/10,6	12,5/50,4	600



## ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая оригинальная методика позволяет определять удельное время легирования поверхностей деталей. В качестве базового значения времени  $\tau$  принято минимальное время обработки единицы поверхности для полного исключения участков с исходным рельефом, а кривые зависимостей изменения массы катода и анода построены по значениям удельного времени, кратных величине  $\tau$ .

2. Установлено, что время легирования ВК8/Ст10 связано обратной зависимостью с рабочим током и частотой следования импульсов.

3. Показано изменение морфологии, химического и фазового составов ЛС в зависимости от параметров  $\tau_{и}$ ,  $E$ ,  $I_p$ . При небольших значениях удельного времени легирования поверхностный слой образца состоит из отдельных участков — островков и свободной поверхности катода. При повышении  $\tau_{и}$  происходит постепенное заполне-

ние "межостровковой" поверхности катода с постепенным увеличением содержания W и уменьшением содержания Fe.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулин Ю. И., Верхотуров А. Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток: Дальнаука, 1999. 110 с.
2. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 321 с.
3. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов / Ф. Х. Бурумкулов, П. П. Лезин, П. В. Сенин и др. Саранск: МГУ им. Н. П. Огарева, 2003. 504 с.
4. Иванов В. И. Об удельном времени ЭИЛ // Тез. докл. междунар. симп., посвященного 100-летию акад. Б. Р. Лазаренко. Кишинев, 2010. С. 255.
5. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Современный уровень развития искровой обработки металлов и некоторые научные проблемы в этой области // Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 1. С. 9—37.
6. Верхотуров А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создание электродных материалов для электроискрового легирования // Дис. ... д-ра техн. наук. Киев: ИПМ УССР, 1984. 578 с.