

С.В. Николенко, А.А. Бурков (Учреждение Российской академии наук  
Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск)  
E-mail: nikola1960@mail.ru

## Некоторые аспекты механизированного электроискрового легирования стали вращающимся торцевым электродом из твердого сплава с различной частотой и длительностью электрических импульсов

*Исследовано влияние физико-химических свойств материала легирующего электрода из твердого сплава ВК8 с добавкой нанопорошка  $Al_2O_3$  на состав, структуру, свойства измененного поверхностного слоя при электроискровом механизированном упрочнении стали 35 с различной частотой и длительностью следования электрических импульсов. Полученные данные могут послужить основой для создания нового поколения установок электроискрового легирования и высоких технологий, а также создания специальных материалов электродов.*

**Ключевые слова:** механизированное электроискровое легирование, материал электрода, нанопорошок  $Al_2O_3$ , упрочняющее покрытие, кинетика массопереноса, атомно-силовая микроскопия, наноструктуры, фазовый состав, микротвердость, износ.

*Influence of physical and chemical properties of alloying electrode material made from hard alloy ВК8 with the additive nanopowder  $Al_2O_3$  on compound, structure, properties of the changed blanket under the electrospark mechanised hardening of a steel 35 with various frequency and duration of following electric impulses is researched. The obtained data can form a basis for creation of new generation of installations for electrospark alloying and high technologies, and also creation of special electrode materials.*

**Keywords:** mechanised electrospark alloying, material of electrode, nanopowder  $Al_2O_3$ , strengthening covering, kinetics mass transfer, atomno-power microscopy, nanostructure, phase structure, microhardness, wear.

### Введение

В настоящее время для электроискрового легирования (ЭИЛ) деталей машин и механизмов существует ряд механизированных установок. Наибольшую известность получили механизированные установки с вращающимся электродом-инструментом [1] и торцевым электродом – методом ЛЕН [2] (способ локального электроискрового наплавления металлов и сплавов с помощью вращающегося электрода) – установки типа ELFA [3], позволяющие значительно повысить износо-, жаро- и коррозионную стойкость обрабатываемых поверхностей.

Однако эти установки имеют ряд существенных недостатков. Так, установки с вращающимся многоэлектродным инструментом [1] не получили должного распространения, поскольку ударное воздействие электродов не позволяет использовать в качестве последних тугоплавкие соединения. К установкам типа ELFA [2, 3] предъявляют высокие требования (диаметр электродов 0,5...1,5 мм), что значительно удорожает сам процесс упрочнения, не позволяет применять форсированные энергетические режимы, а также не дает в полной мере использовать эффект Аскинази [4] – эффект электромеханического выплаживания.

Систематизированных данных о влиянии физико-химических свойств материала электрода на фор-

мирование легированного слоя (ЛС) и его свойства при разных режимах обработки ЭИЛ тугоплавкими металлами и их соединениями не имеется.

В связи с этим представляет научный и практический интерес исследование процесса формирования поверхностного слоя на разработанной установке при легировании сталей твердыми сплавами. Этот выбор обусловлен тем, что они дают наибольшую возможность проследить влияние физико-химической природы материала легирующего электрода на процесс ЭИЛ в широком диапазоне теплофизических и механических констант.

Это позволит полнее изучить закономерности формирования ЛС, которые также будут характерны и для других типов механизированных установок с вращающимся торцевым электродом.

### Методика проведения исследований

В работе исследовали процесс формирования ЛС и его свойств при ЭИЛ вращающимся торцевым электродом на механизированной установке "Электрон-101" (рис. 1) с использованием новой установки модели "IMES" (частота следования электрических импульсов 500 Гц; длительность 20...80 мкс; напряжение 50 В; ток 160...225 А; удельное время легирования 1 мин/см<sup>2</sup>; мощность установки 1 кВт) [5].

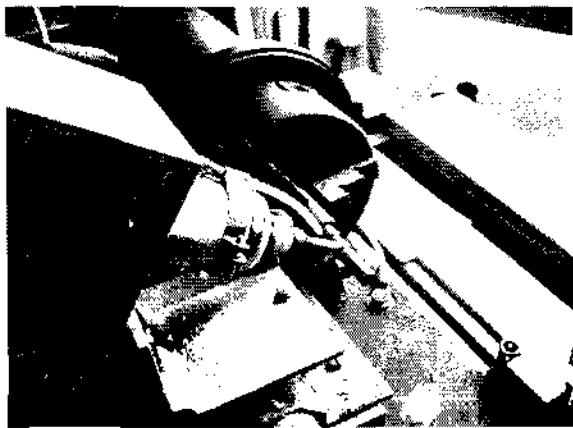


Рис. 1. Установка механизированного ЭИЛ "Элитрон-101"

В Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН методом порошковой металлургии был разработан новый материал электрода на основе сплава ВК8 с 1%-ной добавкой нанопорошка  $Al_2O_3$  [6]. Оксид алюминия использовали как ингибитор роста зерна, что позволило уменьшить средний размер зерна твердого сплава с 2,4 до 0,84 мкм и снизить эрозионную стойкость материала электрода с целью увеличения производительности ЭИЛ.

Ранее было установлено [6], что нанодисперсный оксид алюминия препятствует росту зерен WC срастанием и перекристаллизацией через жидкую фазу. Добавка 1 %  $Al_2O_3$  снижает средний диаметр зерна в полученном сплаве в 1,5 раза, однако дальнейшее его увеличение до 5 % хоть и приводит к уменьшению зерна в 3 раза, но отрицательно сказывается на структуре сплава, нарушает сплошность кобальтового скелета и увеличивает объем твердой фазы и пор.

В процессе ЭИЛ определяли зависимость массы катода (углеродистой машиностроительной стали 35) и эрозию анодов (стандартного твердого сплава ВК8 и нового электрода с добавкой в твердый сплав нанопорошка  $Al_2O_3$ ) от удельного времени легирования и различных электрических параметров. Кроме того, проводили металлографические исследования поперечных срезов упрочняемых образцов, а также рентгенофазовый анализ.

Исследовали кинетику процесса ЭИЛ, включающую временные зависимости суммарных  $\sum \Delta_a$  и удельных эрозий  $\Delta_a$  анода, а также суммарных  $\sum \Delta_k$  и удельных привесов  $\Delta_k$  катода. Эффективность процесса формирования ЛС рассчитывали по формуле ( $cm^2/min$ )

$$\gamma = \sum \Delta_k K_{cp} t_x,$$

где  $t_x$  — порог хрупкого разрушения ЛС, определяемый временем обработки, при котором впервые фиксируется отрицательный удельный привес катода  $\Delta_k$ ;

$K_{cp}$  — коэффициент переноса материала за время  $t_x$ , равный отношению  $\Delta_k/\Delta_a$  ( $\Delta_k$  и  $\Delta_a$  — привес катода и эрозия анода за каждую минуту легирования).

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлена характерная зависимость удельного и суммарного привесов катода от времени обработки при механизированном ЭИЛ стали 35 электродом ВК8 + 1 %  $Al_2O_3$ . Видно, что в данном случае порог хрупкого разрушения ЛС наступает при удельном времени ЭИЛ 7 мин/ $cm^2$ .

При ЭИЛ эффективность процесса зависит от объема, гранулометрического и фазового составов материала, выброшенного из эрозионной лунки анода под воздействием электрического разряда и перенесенного далее на поверхность обрабатываемой детали — катода. Очевидно, что величина этого объема будет зависеть при прочих равных условиях от эрозионных свойств материалов электродов. Поэтому эрозия является одной из важнейших характеристик материала легирующего электрода, ответственных за формирование ЛС.

На рис. 3 приведены зависимости удельной и суммарной эрозии анода от времени легирования стали 35 (частота 500 Гц; напряжение 40 В; ток 250 А; частота вращения электрода 4000  $min^{-1}$ ; частота вращения шпинделя 4  $min^{-1}$ ; среднее значение продольного перемещения электрода  $S = 1,33$  мм/об соответствует удельному времени легирования 1 мин/ $cm^2$ ; мощность установки 1 кВт; плотность электрода 14,1 г/ $cm^3$ ). Характер изменения удельной  $\Delta_a = f(t)$  и суммарной  $\Sigma \Delta_a = f(t)$  эрозии от времени легирования и длительности им-



Рис. 2. Зависимости удельного (1) и суммарного (2) привесов катода от времени легирования

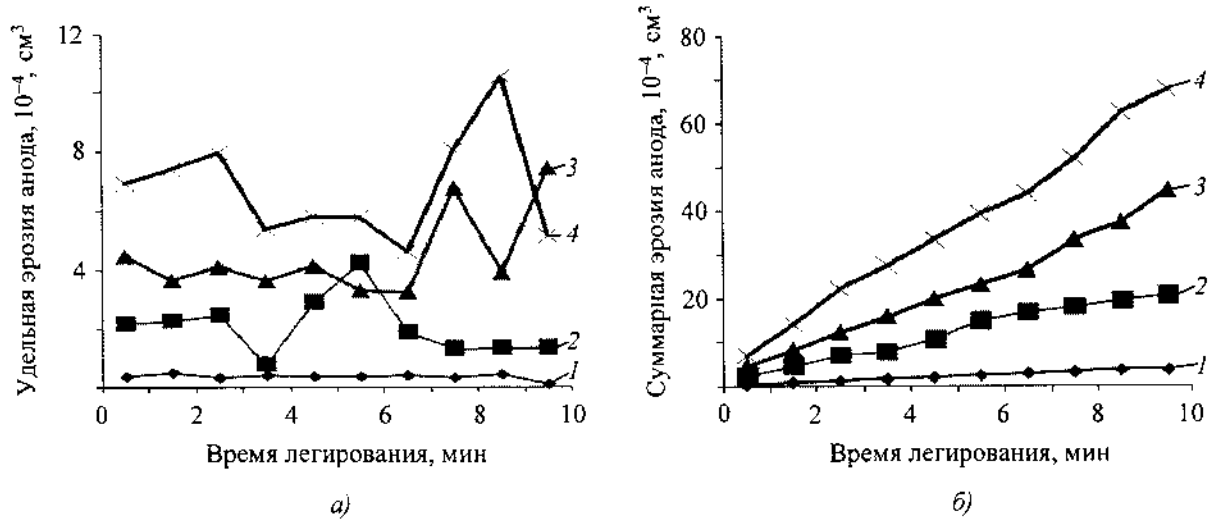


Рис. 3. Зависимости удельной (а) и суммарной (б) эрозии анода от времени легирования стали 35 и длительности импульсов: 1 – 20 мкс; 2 – 40 мкс; 3 – 60 мкс; 4 – 80 мкс

пульсов для электрода на основе карбида вольфрама с добавкой нанопорошка оксида алюминия одинаков. В случае "грубого" легирования (ток 160...225 А) наблюдаются приблизительно прямые зависимости суммарной эрозии материала анода от длительности электрических импульсов.

С увеличением длительности импульсов эрозия повышается: минимальная суммарная эрозия анода при длительности импульсов 20 мкс, максимальная – при 80 мкс. Циклический характер удельных значений эрозии в общем случае указывает на образование на поверхности электрода устойчивой вторичной структуры, снижающей значения эрозии и, соответственно, привеса катода (рис. 4).

Следовательно, для эрозии исследуемых материалов при данных режимах обработки не соблюдается правило аддитивности, по которому следует, что эрозия материалов электродов представляет простую сумму эрозионного эффекта единичных импульсов. Отклонение от указанного правила связано с тем, что в процессе эрозии на рабочих поверхностях электродов образуются вторичные структуры за счет образования оксидов и нитридов при взаимодействии с окружающей средой, происходят изменение температуры электродов, накопление вторичного тепла, что приводит к изменению величины эрозии.

Анализируя характер изменения удельного  $\Delta_k = f(t)$  и суммарного  $\Sigma \Delta_k = f(t)$  привесов катода (см.

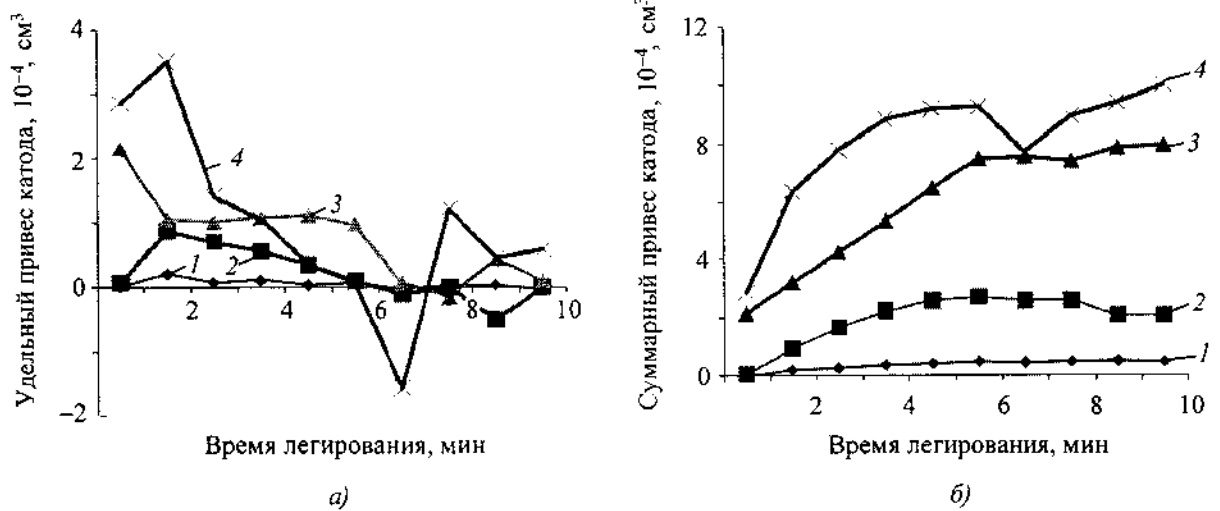


Рис. 4. Зависимости удельного (а) и суммарного (б) привесов катода от времени легирования стали 35 и длительности импульсов: 1 – 20 мкс; 2 – 40 мкс; 3 – 60 мкс; 4 – 80 мкс

Параметры процесса механизированного ЭИЛ стали 35

Длительность, мкс	$\Sigma\Delta_k, 10^{-4}, \text{см}^3$	$\Sigma\Delta_{\text{ср}}, 10^{-4}, \text{см}^3$	$t_x, \text{мин}$	$K_{\text{ср}}, \text{мин}^{-1}$	$\gamma \cdot 10^{-4}, \text{см}^3/\text{мин}$
<i>Электрод ВК8</i>					
20	0,41	0,82	10	0,5	2,05
40	0,27	7,74	6	0,09	0,15
60	1,68	22,16	7	0,05	0,59
80	4,49	19,59	4	0,24	4,31
<i>Электрод ВК8 + 1 % <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></i>					
20	0,46	2,66	7	0,16	0,52
40	2,59	16,74		0,22	3,99
60	7,41	33,44	8	0,24	14,23
80	7,73	43,9	7	0,18	9,74

Примечание. Частота – 500 Гц; напряжение 50 В; ток 160...225 А; основа – сталь 35;  $H_{\mu} = 1,99...2,4$  ГПа.

рис. 4) от времени легирования  $t$  при "грубом" режиме ЭИЛ в целом, при рассмотрении определенного удельного времени легирования, прослеживается тенденция классического представления этих зависимостей, которые описываются полиномами шестой степени. В данном случае с увеличением длительности импульсов суммарный массоперенос увеличивается с  $0,46 \cdot 10^{-4}$  до  $7,73 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$  за время  $t_x$  при ЭИЛ электродом с добавкой нанопорошка оксида алюминия (табл. 1). В целом суммарный привес катода описывается полиномиальными кривыми с достоверностью аппроксимации  $R^2 > 0,994$ .

Из табл. 1 видно, что добавка оксида алюминия в твердый сплав увеличивает его суммарный массоперенос при длительности 80 мкс в 1,7 раза и суммарную эрозию в 2,2 раза в сравнении со стандартным сплавом ВК8. Также вырастает эффективность процесса формирования ЛС с  $4,31 \cdot 10^{-4}$  до  $9,74 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{мин}$ .

Данные металлографического анализа поверхности катода после ЭИЛ показывают, что поверхность исследованных образцов имеет поры, микротрещины (табл. 2, рис. 5, см. с. 4 обложки). Структура поверхностного слоя неравномерна по толщине. Основу покрытия составляют карбиды и оксиды типа  $\text{Co}_x\text{W}_x\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$  с мелкими включениями карбида WC.

Дефектность и степень окисления поверхностных слоев возрастают с увеличением энергии, выделившейся в результате воздействия разрядов.

Структуру выявляли в два этапа: травление основы из стали в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте и травление в реактиве, используемом для травления

твердых сплавов (свежеприготовленная смесь реактивов – 20%-ный раствор едкого натра и 20%-ный раствор красной кровяной соли в равных количествах).

При травлении в первом реактиве выявляется ферритно-перлитная структура стали. На участке стали, прилегающем к белому слою, в результате термического воздействия и быстрого охлаждения образуются тонкие слои, в которых перлитная составляющая подвергается закалке и микротвердость повышается в сравнении с более глубокими участками основы.

После травления во втором реактиве в белом слое выявляется микроструктура, которая так же, как и макроструктура, зависит от режима ЭИЛ. Основная составляющая – белая матрица, которая не травится в использованных для выявления микроструктуры реактивах. При травлении появляются участки дисперсных выделений карбидов цементита и скопления продуктов распада материала анода, число которых увеличивается при режимах со значительным выделением энергии в межэлектродном промежутке.

Микротвердость образцов была измерена в косом сечении на различной глубине: в белом слое на расстоянии  $R$  от поверхности, а в основе на расстоянии  $r$  от линии сплавления белого слоя с основой (сталь). Было установлено, что микротвердость превышает в 7–8 раз микротвердость стали 35 (см. табл. 2, рис. 5, см. с. 4 обложки). Однако при длительности разрядов выше 60 мкс верхние слои электроискрового покрытия имеют пониженную прочность в сравнении с более глубокими слоями покрытия, что связано с разложением карбида вольфрама.

Характеристики покрытий, полученных при механизированном ЭИЛ стали 35

Материал электрода	Длительность, мкс	Сплошность ЛС, %	Толщина ЛС, мм	Микротвердость, ГПа		$K_{упр}^{**} = H_{\mu}^{ЛС} / H_{\mu}^{осн}$	Дефекты макроструктуры
				ЛС	основы		
<i>Частота 400 Гц</i>							
BK8	20	50	0,001...0,017 (0,007±0,001)*	6,86 (R = 0,005 мм)	2,6 (r = 0,012 мм)	2,64	— (Слой плотный)
	80	88	0,001...0,069 (0,020±0,004)	11,65 (R = 0,015 мм)	3,19 (r = 0,015 мм)	3,65	Микротрещины, поры
BK8+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	87	0,001...0,027 (0,013±0,002)	7,3 (R = 0,010 мм)	3,33 (r = 0,014 мм)	2,19	Микротрещины
	60	90	0,002...0,040 (0,018±0,002)	11,03 (R = 0,014 мм)	3,09 (r = 0,014 мм)	3,57	Микротрещины, поры
	80	93	0,001...0,069 (0,018±0,005)	12,63 (R = 0,009 мм)	3,35 (r = 0,009 мм)	3,77	Микротрещины, поры, "горбы"
<i>Частота 500 Гц</i>							
BK8	60	85	0,001...0,060 (0,022±0,004)	8,56 (R = 0,015 мм)	3,5 (r = 0,015 мм)	2,45	Микротрещины, поры
	80	90	0,002...0,076 (0,021±0,005)	10,93 (R = 0,013 мм)	3,24 (r = 0,013 мм)	3,37	
BK8+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	93	0,001...0,055 (0,017±0,003)	11,03 (R = 0,008 мм)	3,25 (r = 0,008 мм)	3,39	Микротрещины
	80	95	0,001...0,074 (0,027±0,006)	13,04 (R = 0,014 мм)	3,3 (r = 0,010 мм)	3,95	

\* Среднее значение.  
 \*\*  $K_{упр}$  — коэффициент упрочнения;  $H_{\mu}^{ЛС}$ ,  $H_{\mu}^{осн}$  — микротвердость соответственно легированного слоя и основы.

Исследования атомно-силовой микроскопии (рис. 6, а, б, см. с. 4 обложки) показали, что при ЭИЛ электродами с использованием 1%-ной добавки нанодисперсного порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и применением вращающегося электрода-инструмента на поверхности ЛС образуется полосчатая структура с размерами от сотен нанометров до нескольких микрометров. Представленные на этом же рисунке цифровые данные соответствуют величине адгезии для каждой отмеченной частицы (рис. 6, в, см. с. 4 обложки).

Также установлено, что при ЭИЛ на твердосплавном аноде в результате окисления и обезуглероживания формируется вторичная структура, состоящая из оксидов, смеси карбидов различной стехиометрии (WC, W<sub>2</sub>C), а также металлического вольфрама. По-

этому для сохранения исходного карбида вольфрама при "грубом" ЭИЛ необходимо использовать защитную атмосферу.

Исследование фазового состава покрытий (рис. 7), полученных при разных параметрах разрядов, показало, что тепловое воздействие приводит к разложению карбида вольфрама за счет взаимодействия углерода с кислородом воздуха. На первом этапе электроискровой обработки WC переходит в W<sub>2</sub>C, а затем в вольфрам. Такие изменения проявляются как с ростом времени легирования, так и при увеличении длительности разрядов.

Характеристики износостойкости покрытий, полученных при ЭИЛ электродами на основе карбида вольфрама, представлены на рис. 8. Анализ экспери-

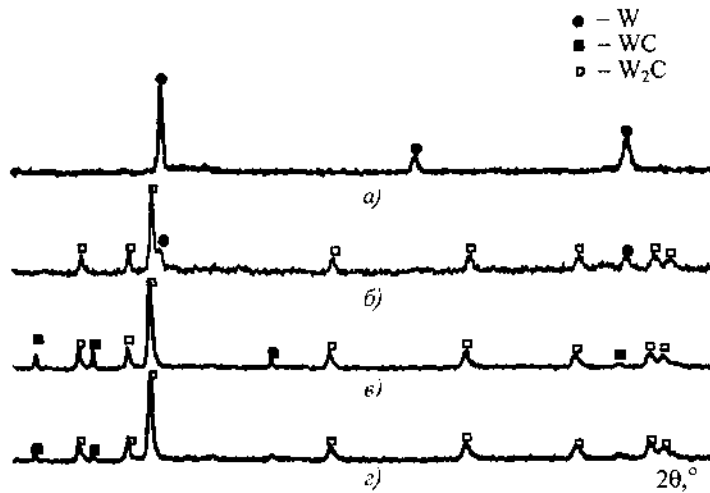


Рис. 7. Фрагменты дифрактограммы ЭИЛ-покрытий на стали 35 на основе карбида вольфрама с частотой импульсов 400 Гц и длительностью: а – 200 мкс; б – 100 мкс; в – 80 мкс; г – 40 мкс

ментальных результатов показывает, что введение оксида алюминия в твердый сплав во всех случаях испытаний приводит к повышению износостойкости ЛС. Наилучшие результаты получены при ЭИЛ электродом с добавкой нанопорошка оксида алюминия с частотой 500 Гц и длительностью импульсов 40 мкс (см. рис. 8, кривая 3).

Можно отметить, что на износостойкость ЛС значительное влияние оказывает структура поверхностного слоя. Образованная полосчатая структура размером в несколько сотен нанометров, полученная твердым сплавом с добавками нанопорошка оксида

разрабатываемой установки. Установлено, что эффективность процесса ЭИЛ увеличивается с повышением длительности импульсов. Добавка оксида алюминия в твердый сплав увеличивает его суммарный массоперенос при длительности 80 мкс в 1,7 раза и суммарную эрозию в 2,2 раза в сравнении со стандартным сплавом ВК8, также вырастает эффективность процесса формирования ЛС с 4,31 до 9,74 см<sup>3</sup>/мин.

2. Исследовано влияние физико-химических свойств материала легирующего электрода из твердого сплава ВК8 с добавкой нанопорошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на состав, структуру, свойства измененного поверхностного слоя при электроискровом механизированном упрочнении стали 35 с различной частотой и длительностью следования электрических импульсов. Полученные данные могут послужить основой для создания нового поколения установок ЭИЛ и высоких технологий, а также создания специальных материалов электродов.

3. Проведенные металлографические исследования формирования ЛС на образцах из стали 35 показали, что микротвердость ЛС превышает в 7–8 раз микротвердость стали 35. Наибольший коэффициент упрочнения 3,95 достигнут при ЭИЛ стали 35 на 500 Гц и частоте 80 мкс.

4. Исследования атомно-силовой микроскопии показали, что при ЭИЛ новыми материалами электродов с использованием 1%-й добавки нанодисперсного порош-

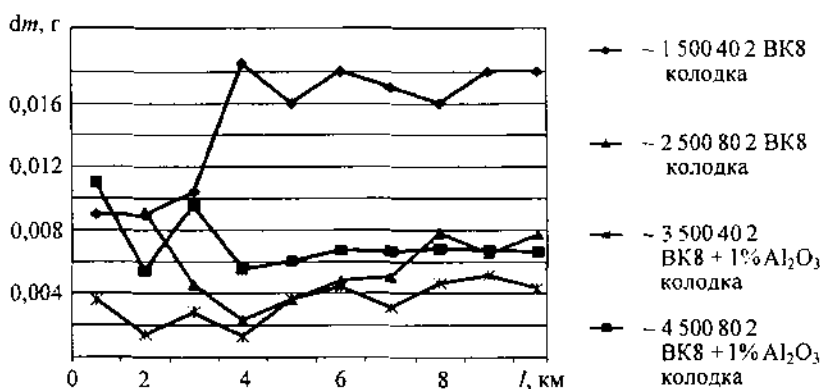


Рис. 8. Относительный износ ЛС на стали 35 с покрытиями из типового сплава ВК8 и ВК8 + 1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1–4 – номер образца; 500 – частота следования электрических импульсов, Гц; 40, 80 – длительность импульсов, мкс; 2 – удельное время ЭИЛ, мин/см<sup>2</sup>; d<sub>m</sub> – потеря массы, г; l – путь износа, км)

ка  $Al_2O_3$  и применением вращающегося электрода-инструмента на поверхности ЛС образуется полосчатая структура с размерами от сотен нанометров до нескольких микрометров.

5. Исследования на износостойкость показывают, что введение оксида алюминия в твердый сплав во всех случаях испытаний приводит к повышению износостойкости ЛС.

*Авторы благодарят В.А. Баранова, А.П. Кузьменко, Л.П. Метлицкую, С.А. Пячина за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов исследований.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Коваленко С.В. Формирование поверхностного слоя при механизирован-

ном электроискровом легировании переходными металлами // Перспективные материалы. 2002. № 5. С. 59–67.

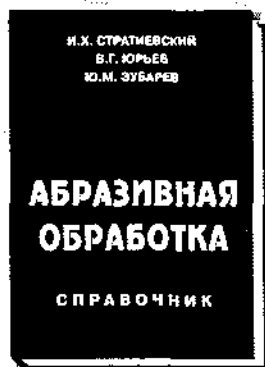
2. Ливурдов В.И., Снежков В.А., Панайотов С.И. и др. Электрические характеристики установки для ЭИЛ типа ELFA // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 31–35.

3. Способ локального электроискрового наплавления металлов и сплавов с помощью вращающегося электрода и устройства для его осуществления: пат. 16801 НРБ / Б.Т. Антонов. 27.11. 1971.

4. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.

5. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. Новые электродные материалы. Дальнаука, 2005. С. 219.

6. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Дворник М.И. и др. Использование нанопорошка  $Al_2O_3$  в качестве ингибитора роста зерна в сплаве ВК8 / Вопросы материаловедения. № 2(34). 2008. С. 100–105.



## АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА: справочник И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев

2010. — 352 с.: ил. ISBN 978-5-94275-522-5

Цена 700 р.

Содержит данные об основных видах современных абразивных инструментов, выборе их характеристик и подготовке к эксплуатации. Для наиболее распространенных способов абразивной обработки приведены рекомендации по режимным параметрам, применяемому оборудованию и технологической оснастке, смазывающим технологическим средствам, оценке эксплуатационных свойств инструментов. Учтены изменения в стандартах, произошедшие в последние годы.

Предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторов и технологов, студентов и преподавателей высшего и среднего профессионального образования.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:  
по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU