

# НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ НОВЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

С.В. Николенко<sup>\*</sup>, А.П. Кузьменко<sup>\*\*</sup>, Д.И. Тимаков<sup>\*\*</sup>, П.В. Абакумов<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Учреждение Российской академии наук Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,  
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия, [nikola1960@mail.ru](mailto:nikola1960@mail.ru)

<sup>\*\*</sup> Юго-Западный государственный университет,  
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия, [apk3527@mail.ru](mailto:apk3527@mail.ru)

## Введение

Формирование высокопрочных поверхностных наноструктурированных слоев из твердосплавных карбидных, боридных и нитридных включений на основе давно и успешно зарекомендовавшего себя метода электроискрового легирования (ЭИЛ) [1] характеризуется целым комплексом конкурентных преимуществ. Поверхностные легированные слои (ЛС) на металлической основе создаются компактным электродом как из токопроводящих, так и нетокопроводящих порошковых материалов, обладают высокими адгезионными, эксплуатационными и функциональными свойствами, формируются при сравнительно низкой энергоёмкости и простоте техпроцесса [2].

Благодаря достигнутому уровню развития исследовательской и испытательной техники наномасштабного разрешения (атомно-силовой и растровой электронной микроскопии, малоуглового рентгеновского рассеяния, микроспектральных методов, наноинденторов, испытательных приборов) созданы принципиально новые условия для решения материаловедческой триады: установления взаимосвязи состава-структуры-свойств поверхностных слоев с технологическими режимами и параметрами формирования. Установлено, что в условиях единичного электрического разряда в системе металлический катод-анод на катодной поверхности происходит образование упорядоченного скопления нанокластеров, состоящих из наночастиц с размерами вплоть до 30 нм [3]. Этот факт заставляет по-новому оценить возможности ЭИЛ, а также ставит задачу наноразмерного изучения структуры формируемых ЛС.

Концентрация интересов исследователей на изучении поверхностей вполне обоснована, так как именно в поверхностных слоях первично как зарождаются дефектные образования, так и создаются условия, тормозящие развитие усталостных трещин. В технологии ЭИЛ качественные характеристики ЛС существенно зависят от электродного материала (ЭМ). Материалом для него выступают, как правило, твёрдые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, в том числе и наноструктурированного карбида вольфрама [2]. Однако такие электродные материалы имеют высокую эрозионную стойкость. В настоящей работе исследован процесс формирования ЛС на сталях вновь созданными электродными материалами, содержащими WC с добавками нанопорошка оксида алюминия, проведен сравнительный анализ их свойств с ЛС, полученными электродами из стандартного твердого сплава ВК8.

## Оборудование, методики и материалы

ЛС наносились на типовой механизированной установке с вращающимся торцевым электродом типа «Элитрон-101». Обработка велась электрическими импульсами от специально разработанного генератора импульсов модели IMES [1]. При выборе режимов обработки управляющими параметрами выступали частота следования электрических импульсов (варьировались до 400 Гц) и их длительность, которая могла принимать дискретные значения – 10, 20, 40, 60, 80 мкс. Мощность установки – 1,5 кВт, напряжение – 50 В, величина тока изменялась в интервале 160–225 А. Скорость обработки поддерживалась в пределах 1 см<sup>2</sup>/мин.

Наносились ЛС с помощью специально разработанных электродных материалов, синтезированных методами порошковой металлургии в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН. Состав ЭМ включал сплав ВК8 и добавки нанопорошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1–5%) [2]. Оксид алюминия выступал в качестве ингибитора роста зерна, позволял уменьшить средний размер зерна твердого сплава с 2,4 мкм до 0,84 мкм и снизить эрозионную стойкость ЭМ с целью увеличения производительности электроискрового легирования.

Как установлено ранее [2], нанодисперсный  $Al_2O_3$  препятствует росту зерен WC путем срастания и перекристаллизации через жидкую фазу. Добавка 1%  $Al_2O_3$  вызывает уменьшение среднего диаметра зерна в сплаве в 1,5 раза. Однако при дальнейшем увеличении его содержания (до 5%), наряду с уменьшением зерна в 3 раза, ухудшается структура сплава, нарушается сплошность кобальтового связующего скелета и увеличивается объем твердой фазы и пор, что в целом понижает физико-химические характеристики формируемого ЛС.

Анодом служили либо стандартные твердые сплавы ВК8, либо вновь разработанные ЭМ с добавкой в твердый сплав ВК8 нанопорошка  $Al_2O_3$ . Катодом выступали образцы углеродистой стали 35 весом не более 50 г, что позволяло затем их исследовать методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Анализ процесса ЭИЛ проводился по стандартным методикам. Изучалось изменение привесов катода и эрозии анода за определенное время легирования при различных электрических параметрах.

Гранулометрический анализ продуктов эрозии осуществлялся по методике [4] на микроскопе МБС-9, металлографические исследования поперечных срезов упрочняемых образцов – на оптическом микроскопе с насадкой для индентирования, рентгенофазовый анализ поверхности легированных образцов – на установке ДРОН-7, атомно-силовые микроскопические исследования – на АСМ Aist-NT SmartSPM (г. Зеленоград), комбинационное рассеяние света изучалось на микроспектрометре OmegaScope, интегрированном с Aist-NT SmartSPM (г. Зеленоград).

Износостойкость образцов после ЭИЛ определялась через каждый километр пути трения по стандартной методике – по схеме “вал-колодка” на машине трения МТ-22П при нагрузке 100 Н со скоростью скольжения 0,025 м/с в условиях трения без смазки. Материалом контртела являлась закалённая сталь 40Х (HRC 58–60).

Исследованы временные зависимости суммарных и удельных эрозий анода, а также суммарных и удельных привесов катода. Эффективность процесса формирования ЛС рассчитывалась по формуле  $\gamma = \Sigma \Delta_a K_{cp} t_x$ , ( $cm^3/min$ ). Здесь  $t_x$  – порог хрупкого разрушения ЛС, то есть время обработки, после которого возникает отрицательный удельный привес катода,  $K_{cp}$  – коэффициент переноса материала за время  $t_x$ , равный отношению  $K_{cp} = \Delta_k / \Delta_a$ ,  $\Delta_k$  и  $\Delta_a$  – привес катода и эрозия анода за каждую последующую минуту легирования.

### Результаты и обсуждение

Эффективность процесса ЭИЛ зависит от объёма, гранулометрического и фазового состава материала, выносимого из эрозионной лунки анода под воздействием электрического разряда и осаждаемого на поверхности обрабатываемой детали – катода.

Очевидно, что величина привеса катода существенным образом обуславливается эрозионными свойствами ЭМ. С этой целью были изучены временные зависимости удельной и суммарной эрозии анода в процессе легирования стали 35 электродами – ВК8+1%  $Al_2O_3$  и ВК8+5%  $Al_2O_3$  на частоте 400 Гц. Установлено, что удельная  $\Delta_a$  и суммарная  $\Sigma \Delta_a$  эрозия анода от времени  $f(t)$  и длительности импульсов для ЭМ на основе WC с добавкой нанопорошка  $Al_2O_3$  не изменяются.

В нашем случае «грубого» легирования (ток 160–225 А) зависимость суммарной эрозии материала анода от длительности электрических импульсов приближенно можно принять линейной. Эрозия материала анода возрастает с увеличением длительности импульсов. Минимальная суммарная эрозия анода с 1% и 5% добавками  $Al_2O_3$  наблюдается при длительности импульсов 20 и 10 мкс соответственно, тогда как уже при длительности 80 мкс эрозия становится максимальной. Удельная эрозия изменяется циклически, что может быть обусловлено образованием на поверхности электрода устойчивой вторичной структуры, снижающей как эрозию, так и привес катода. Это означает, что для исследуемых материалов и режимах обработки не соблюдается правило аддитивности: суммарная эрозия  $\Sigma \Delta_a$  материалов электродов оказывается не равной сумме эрозионных эффектов единичных импульсов. Видимо, это нарушение вызывается образованием вторичных структур (оксидов и нитридов за счет взаимодействия продуктов эрозии с окружающей средой), увеличением температуры электродов (накопление тепла в процессе ЭИЛ). Изменения удельного и суммарного привесов катода ( $\Delta_k$ ,  $\Sigma \Delta_k = f(t)$ ) в зависимости от времени легирования  $t$  на исследуемом «грубом» режиме ЭИЛ могут аппроксимироваться полиномами шестой степени.

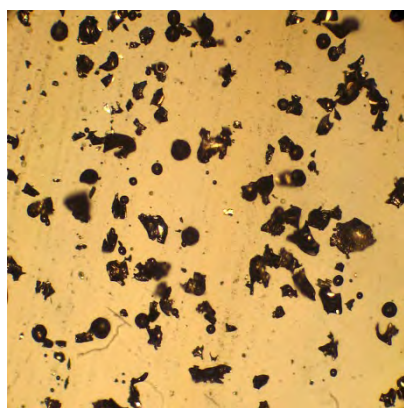
Параметры процесса ЭИЛ на стали 35 с помощью исследуемых электродных материалов представлены в табл. 1. В соответствии с данными табл. 1 с увеличением длительности импульсов суммарный массоперенос вплоть до времени хрупкого разрушения –  $t_x$  с ростом добавок  $Al_2O_3$  убывает: для добавки 1% его величина изменялась от 3,26 до 14,75  $cm^3$ , тогда как для 5% с 3,92 до 11,54  $cm^3$  (табл. 1). Отмечается увеличение суммарного массопереноса и эрозии с ростом длительности импульсов. Так, при длительности 80 и 20 мкс наблюдался их рост: при добавке 1% нанопорошка

$Al_2O_3$  – в 4 раза, а при 5% добавке  $Al_2O_3$  – в 3 раза соответственно. Сравнительный анализ показывает, что эффективность процесса формирования ЛС ЭМ с добавками 1% нанопорошка  $Al_2O_3$  существенно возрастает. Эффективность формирования одинаковых по характеристикам ЛС из типового сплава ВК8 была в 3 раза ниже, чем ЭМ с добавками 1% нанопорошка  $Al_2O_3$ . Оптимальные длительности импульсов составили 60 и 20 мкс соответственно. Рост эффективности сохранялся и при увеличении до 5% добавки нанопорошка  $Al_2O_3$ . Общей закономерностью процесса ЭИЛ ЭМ с добавками нанопорошка  $Al_2O_3$  (см. табл. 1) является повышение эффективности, а также увеличение длительности импульсов, что позволяет создавать диктуемые практическими потребностями наибольшие по толщине ЛС.

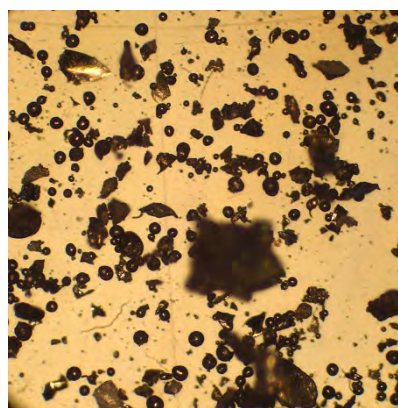
Гранулометрический анализ продуктов эрозии при искровом разряде указывает на наличие: шарообразной (или близкой к ней) или неправильной формы с рваными краями (рис. 1, табл. 2). Это может быть обусловлено действием разных механизмов: в первом случае – формирование из жидкой фазы, во втором – из твердой фазы в процессе хрупкого разрушения материала анода [5].

Таблица 1. Параметры процесса формирования легированного слоя на стали 35

Длительность, мкс	$\Sigma\Delta_k \times 10^{-4}, \text{ см}^3$ (за $t_x$ )	$\Sigma\Delta_a 10^{-4} \text{ см}^3$ (за $t_x$ )	$t_x$ , мин	$K_{cp}, \text{ мин}^{-1}$	$\gamma \cdot 10^{-4}, \text{ см}^3/\text{мин}$
Электрод ВК8, частота 400 Гц					
20	2,6	6,64	10	0,39	10,14
40	7,33	15,48	10	0,45	32,99
60	7,67	15,34	9	0,48	33,13
80	5,14	11,09	6	0,34	10,49
Электрод ВК8+ 1% $Al_2O_3$ , частота 400 Гц					
20	3,26	7,38	10	0,42	13,69
40	9,22	21,56	10	0,4	36,88
60	10,85	21,77	10	0,47	50,99
80	14,75	28,23	10	0,49	72,28
Электрод ВК8+ 5% $Al_2O_3$ , частота 400 Гц					
20	3,92	6,77	10	0,6	23,52
40	8,46	14,85	10	0,55	46,53
60	9,54	21,23	10	0,42	40,07
80	11,54	21,69	10	0,49	56,55



а



б

Рис. 1. Продукты эрозии ЭИЛ на стали 35 (x400): а – ВК8 (80 мкс); б – ВК8 + 5%  $Al_2O_3$  (80 мкс)

Следует отметить, что содержание частиц твердой фазы выше 50–60% ухудшает качество формируемого ЛС. Как показано ранее [5], смачиваемость с катодом жидкофазной составляющей анода и уменьшение размеров продуктов его эрозии приводят к росту адгезии, плотности и твердости ЛС. Выборка из данных гранулометрического анализа состава исследуемых продуктов эрозии показывает, что они в основном представлены частицами хрупкого разрушения – более 70%. При внесении в твердый сплав добавок в виде нанопорошка  $Al_2O_3$  (в пределах от 1 до 5%) или оксида вольфрама растет доля шарообразных частиц, имеющих жидкофазное происхождение. Такой же эффект дос-

тигается при длительности импульсов 20–80 мкс. Доля шарообразных частиц в этом случае превышает 60%, что может быть обусловлено разогревом материала анода за счет плазмы разряда. Гранулометрический анализ продуктов эрозии стал основой для установления рациональных количеств добавок нанопорошка  $Al_2O_3$ .

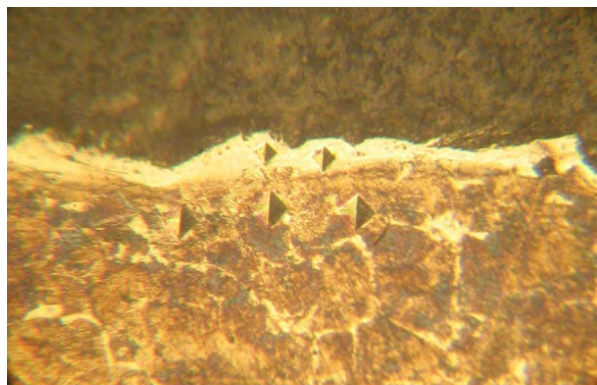
Таблица 2. Гранулометрический состав продуктов эрозии ЭМ системы WC – Co, WC – Co + 1 или 5%  $Al_2O_3$  в ЛС на стали 35. Начальный размер частиц ~ 2 мкм; частота – 400 Гц, напряжение – 40 В, ток – 250 А

Материал анода	Шарообразные частицы		Частицы хрупкого разрушения	
	Ø, мкм	содержание, %	размер, мкм	содержание, %
BK8	Длительность 20 мкс			
	41,85	29,7	58,9	70,3
	Длительность 80 мкс			
	58,9	28,4	79,05	71,6
BK8+1% $Al_2O_3$	Длительность 20 мкс			
	41,85	34,0	102,3	64,0
	Длительность 80 мкс			
	58,9	51,6	102,3	48,4
BK8+5% $Al_2O_3$	Длительность 20 мкс			
	41,85	40,3	58,9	59,7
	Длительность 80 мкс			
	41,85	60,9	158,1	39,1

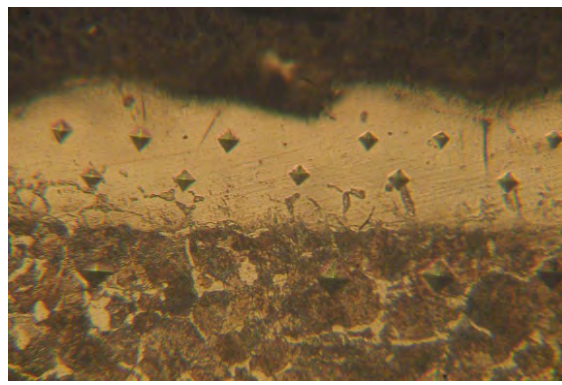
Металлографический анализ поперечного шлифа катода с нанесенным ЛС показывает, что в поверхностном слое в исследованных образцах присутствуют поры, микротрещины (рис. 2). Структура поверхностного слоя неравномерна по толщине. При травлении реактивом № 1 выявляется феррито-перлитная структура стали, реактивом № 2 – микроструктура, которая, так же как и макроструктура, зависит от режима ЭИЛ.

На участке стали, прилегающем к белому слою, в результате термического воздействия разряда и плазмы с последующим быстрым охлаждением образуются тонкие слои, в которых перлитная составляющая подвергается закалке. В этом слое отмечается повышение микротвердости, как это демонстрирует изменение следов индентора (рис. 2). При травлении реактивом № 2 в белом слое выявляются участки с очень дисперсными карбидами цементита и скоплениями продуктов распада материала анода. Возрастание твердофазных скоплений характерно для жестких режимов ЭИЛ, однако при этом отмечается рост дефектности и окисления ЛС и прилегающих слоев материала основы.

Рентгенофазовый анализ ЛС, получаемых при ЭИЛ на разных режимах, показал, что повышение теплового воздействия вызывает разложение WC [5] за счет взаимодействия углерода с кислородом воздуха. Основу покрытия составляют карбиды типа  $W_2C$ ,  $Co_x$ ,  $W_xC$  с мелкими включениями WC. При грубой ЭИЛ обработке (согласно рис. 3 «сверху-вниз») последовательно инициируется реакция  $WC \rightarrow W_2C$  вплоть до восстановления W. Аналогичные химические реакции возникают при увеличении как времени легирования, так и длительности разрядов.



а



б

Рис. 2. Микроструктура ЛС на стали 35: а – BK8; б – BK8 + 1%  $Al_2O_3$  (× 700)

Измерения микротвердости по сечению покрытий проводились на различной глубине ЛС на поперечных шлифах образцов, которые изготавливались в наклонном положении. В покрытиях, полученных при оптимальных режимах ЭИЛ, величина микротвердости ЛС более чем в 7 раз превышала микротвердость стали 35 (рис. 2). В то же время при длительности разрядов более 60 мкс она снижалась по глубине, что, видимо, объясняется разложением WC.

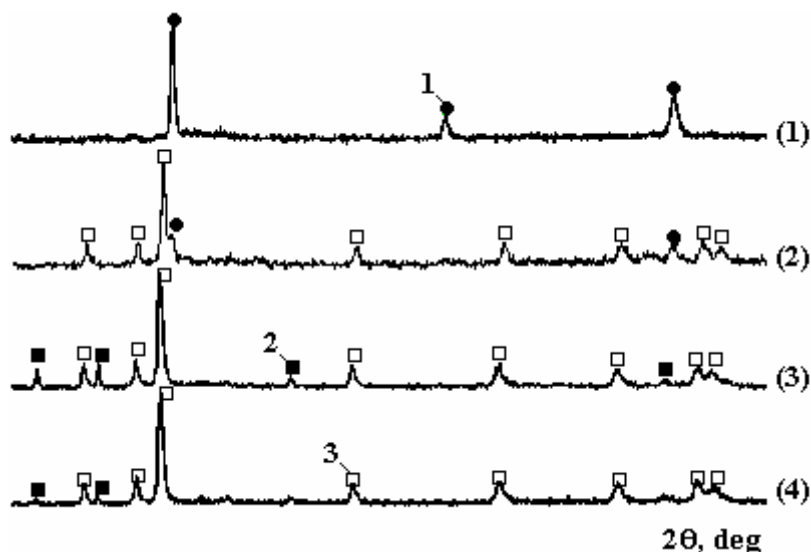


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы ЭИЛ покрытий на стали 35 ЭМ на основе карбида вольфрама с частотой импульсов 400 Гц и длительности: 200 мкс (1); 100 мкс (2); 80 мкс (3); 40 мкс (4). 1 – W; 2 – WC; 3 – W<sub>2</sub>C

Таким образом, необходимый для твердосплавного анода «грубый» режим ЭИЛ сопряжен с процессами окисления, обезуглероживания, сопровождается формированием вторичной структуры, состоящей из окислов, смеси карбидов различной стехиометрии (WC, W<sub>2</sub>C) и даже металлического W. Очевидно, что для сохранности исходного WC в процессе ЭИЛ следует применять защитную (аргоновую) атмосферу.

С учетом того, что ЛС имеют высокую шероховатость, а методы АСМ не допускают изучения таких поверхностей, предварительно все образцы были проанализированы на конфокальном микроскопе, совмещенном с АСМ. В результате по специально разработанной методике не только удалось отобрать образцы, пригодные для исследований методом АСМ, но и выделить области на поверхности ЛС, где предположительно происходило наноструктурирование в процессе ЭИЛ. Такие области отличались цветом вплоть до синеватого (рис. 4,а).

Из АСМ сканограммы, представленной на (рис. 4,б), видно, что наименьший размер наночастиц был обнаружен в составе ЛС, полученном электродом ВК8 с 1% добавкой нанопорошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Минимальный размер частиц составил менее 30 нм (рис. 4,б). В процессе ЭИЛ с вращающимся электродом-инструментом в ЛС формировались регулярные полосы с размерами от сотен нм до нескольких мкм (рис. 4,в). Представленные на этом же рисунке цифровые данные соответствуют величине адгезии для каждой отмеченной частицы. При одинаковом фазовом составе рост этого параметра может также подтверждать уменьшение размера исследуемых наночастиц.

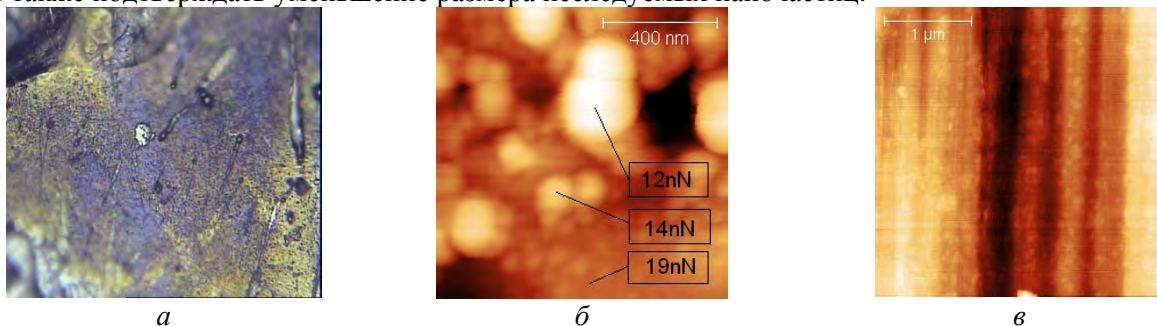


Рис. 4. Оптическое и АСМ изображения ЛС: а – фотография ЛС в конфокальном микроскопе, б и в – АСМ сканограммы размером 3×3 и 1×1 мкм соответственно

Спектры комбинационного (рамановского) рассеяния света (КРС) наблюдались в ЛС, выбранных по уже представленной методике с пространственным разрешением не более 50 нм при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 473, 532 и 785 нм. Измерения спектров КРС производились при нормальных условиях. Для образца с ЛС (рис. 4,а) в областях конфокальных изображений с желтым и синим оттенками методом КРС установлено, что их интенсивность, соответствующая колебаниям атомов в молекулах WC [6], максимальна (табл. 1, рис. 5 – кривые 1 и 3). Существенная интенсивность этих же линий в спектре КРС возникла и в образце с ЛС, полученном электродом смешанного состава (с добавкой к ВК8 5% нанопорошка  $Al_2O_3$ ) (на рис. 5 – кривая 2), как видно из рис. 5, эти линии практически одинаковы по интенсивности с линиями для образца (кривые 1, 3). На остальных образцах интенсивность линий КРС, ответственных за наномасштабные WC включения, становится весьма несущественной (кривые 4 – 7). Таким образом, наномасштабное излучение КРС на исследуемых образцах позволило подтвердить фазовый состав, а именно наличие WC в составе наноструктурированного ЛС (см. рис. 4). Этот результат указывает на возможность качественного микроанализа параметров ЛС ЭИЛ методом КРС.

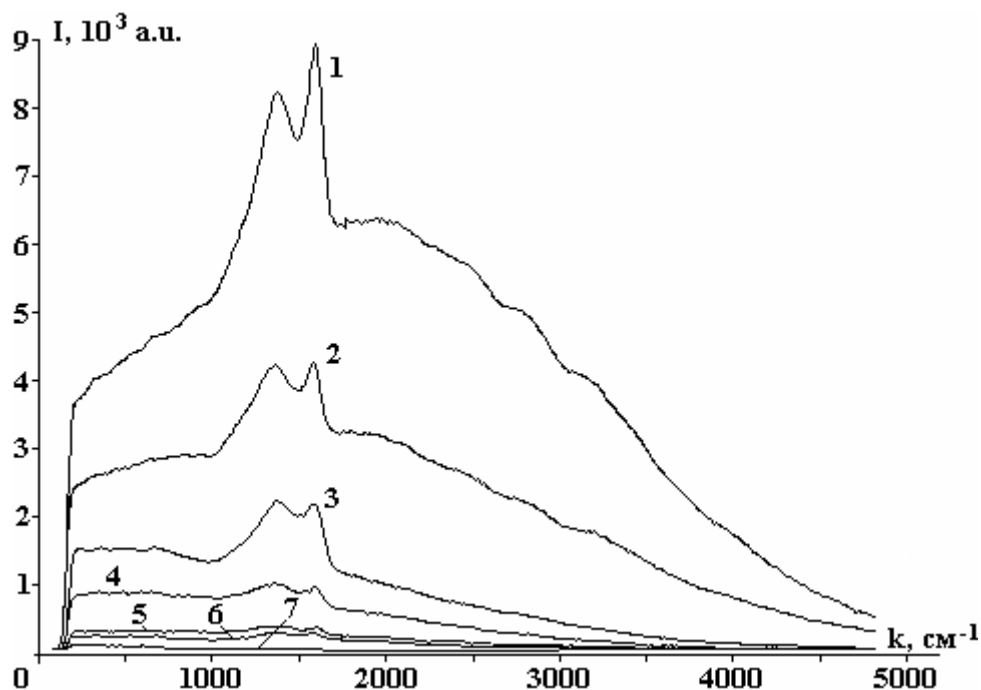


Рис. 5. Спектры КРС в наноструктурированных ЛС

При анализе спектров КРС принималось во внимание, что кристалл карбида вольфрама принадлежит к гексагональной сингонии с пространственной группой  $D_{3h}^1$  в обозначения Шенфлиса. Тогда, так же как в [6], полученный спектр КРС представляет собой 2 гауссова пика – 1350 и 1530  $cm^{-1}$ , что соответствует 4,05 и 4,59 ГГц. Пик 1350  $cm^{-1}$  отвечает за колебания в  $D$  моде, а 1530  $cm^{-1}$  –  $G$  моде.

Характеристики покрытий представлены в табл. 3. Исходная микротвердость  $H_{\mu}$  образцов из стали 35 лежала в пределах 2,6, ..., 3,5 ГПа. В таблице принято  $K_{упр}$  – коэффициент упрочнения, равный отношению  $H_{\mu}^{ЛС}/H_{\mu}^{основа}$ , где  $H_{\mu}$  – микротвердость легированного слоя и основы соответственно. Максимальный  $K_{упр}$  достигается ЭИЛ стали электродным материалом с добавкой 1,3%  $Al_2O_3$ , тогда как наибольшая сплошность и толщина ЛС характерны для образцов – 3,5%  $Al_2O_3$ .

Результаты измерения износостойкости полученных ЭИЛ покрытий представлены на рис. 6. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – 4 – номер образца, 400 – частота следования электрических импульсов, Гц, 40, 80 – длительность импульсов, мкс, 2 – время ЭИЛ, мин/ $cm^2$ ;  $dm$  – потеря массы, г,  $I$  – путь износа, км. Введение нанопорошка  $Al_2O_3$  в твердый сплав ВК8 во всех случаях повышает износостойкость ЛС. Наилучшие результаты получены при ЭИЛ ЭМ с добавкой 3% нанопорошка  $Al_2O_3$ . Покрытие наносилось с частотой 400 Гц импульсами длительностью 40 мкс (кривая 3). Можно отметить, что на износостойкость ЛС значительное влияние оказывает структура поверхностного слоя. Полосчатая структура с размерами до нескольких сотен нм, полученная твердым сплавом с добавками нанопорошка  $Al_2O_3$  вращающимся электрод-инструментом, имеет лучшие

результаты по износостойкости по сравнению с покрытиями, полученными твердым сплавом ВК8 при длительности импульсов 40 мкс. Увеличение длительности импульсов до 80 мкс отрицательно сказывается на износостойкости вследствие чрезмерного разогрева электрода, что сопровождается разложением карбида вольфрама вплоть до вольфрама.

Таблица 3. Характеристики покрытий, полученных при механизированном ЭИЛ стали 35

Материал электрода	Длительность, мкс	Сплошность ЛС, %	Толщина ЛС, мм	Микротвердость, ГПа		$K_{упр}$
				ЛС	основы	
Частота 400 Гц						
ВК8	20	50	0,001–0,017 ср. 0,007 ± 0,001	6,86	2,6	2,64
	80	88	0,001–0,069 ср. 0,020 ± 0,004	11,65	3,19	3,65
ВК8+ +1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	64	0,002–0,036 ср. 0,018 ± 0,003	R=0,010 мм 12,51	r=0,014 мм 3,19	3,92
	60	78	0,002–0,040 ср. 0,018 ± 0,002	12,19	3,07	3,97
	80	68	0,002–0,054 ср. 0,016 ± 0,004	10,98	4,03	2,72
ВК8+ +3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	95	0,002–0,048 ср. 0,021 ± 0,004	11,04	2,99	3,69
	60	98	0,002–0,049 ср. 0,024 ± 0,004	12,51	3,74	3,34
	80	97	0,008–0,074 ср. 0,038 ± 0,005	12,83	4,34	2,96
ВК8+ +5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	82	0,002–0,043 ср. 0,025 ± 0,004	11,09	3,44	3,22
	60	87	0,002–0,049 ср. 0,024 ± 0,004	11,63	3,45	3,37
	80	97	0,002–0,094 ср. 0,037 ± 0,006	12,37	4,26	2,9

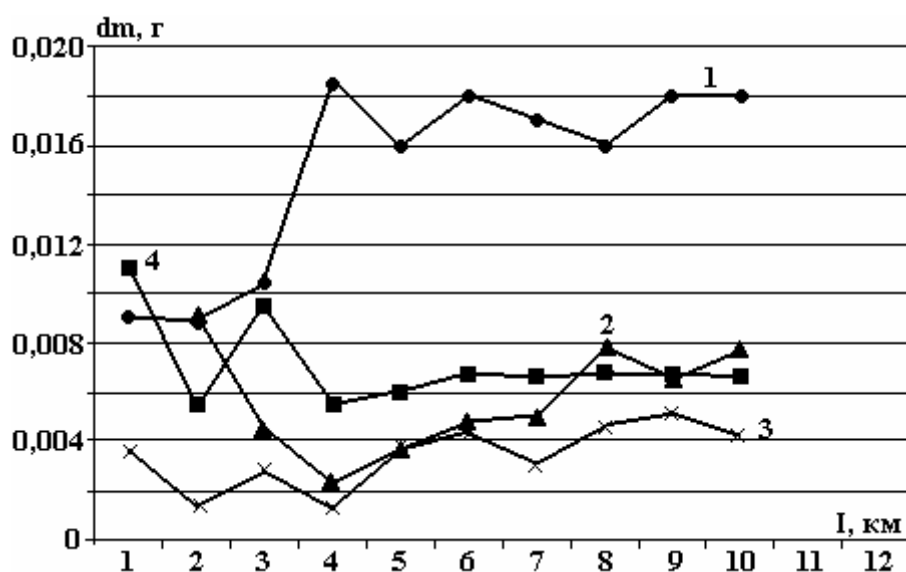


Рис. 6. Относительный износ ЛС на стали 35 с покрытиями из типового сплава ВК8 и ВК8 с добавкой порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 1 – 1400402 мин/см<sup>2</sup> ВК8; 2 – 2400802 мин/см<sup>2</sup> ВК8+1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – 3400402 мин/см<sup>2</sup> ВК8+3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – 4400802 мин/см<sup>2</sup> ВК8+5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## Выводы

Изучение процесса формирования ЛС на стали 35 с помощью механизированного ЭИЛ типовым сплавом ВК8 и сплавом ВК8 с добавкой 1–5 мас.% нанопорошка  $Al_2O_3$  позволило установить рациональные параметры и режимы работы макета разработанной установки. Показано, что эффективность процесса «грубого» ЭИЛ возрастает при повышении длительности импульсов до характерного для каждого электродного материала предела. Добавка  $Al_2O_3$  в количестве 1 мас.% в ВК8 увеличивает по сравнению со стандартным сплавом ВК8 суммарный массоперенос и эффективность процесса формирования ЛС почти в 3 раза. Микротвердость легированных слоев превышает в 3–4 раза микротвердость стали 35. Определены наиболее эффективные режимы ЭИЛ и состав формируемых ЛС: частота 400 Гц и длительность до 80 мкс для электрода ВК8 с 1% добавкой нанопорошка  $Al_2O_3$ . При введении в ВК8 добавок нанопорошка  $Al_2O_3$  (до 1–5%) и длительности импульсов от 20 до 80 мкс содержание сферических частиц, сформированных из жидкофазной составляющей, повышается до 60%. Методами АСМ обнаружено формирование в процессе ЭИЛ в ЛС регулярной полосовой наноструктуры, образованной из наночастиц WC. Введение  $Al_2O_3$  в ВК8 повышает износостойкость ЛС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. *Новые электродные материалы*. Дальнаука, 2005. С. 219.
2. 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*. 2008, (2), 100–105.
3. Пячин С.А., Заводинский В.Г., Кузьменко А.П., Пугачевский М.А., Бурков А.А., Тимаков Д.И. Поверхностное структурирование меди под действием электрического разряда. *Письма в ЖТФ*. 2010, **36**(14), 34–40.
4. Намитоков К.К. *Электроэрозионные явления*. М.: Энергия. 1978. 456 с.
5. Колгачев А.Е., Панин С.В., Почивалов Ю.И., Антипина Н.А. Влияние предварительного наноструктурирования поверхностного слоя на износостойкость титанового сплава ВТ6, подвергнутого химико-термической обработке. *Известия Томского политехнического университета*. 2006, **309**(2), 144–148.
6. Zhang S., Xie H., Hing P., Mo Z. Adhesion and raman studies of magnetron sputtered amorphous carbon on WC-Co. *Surface Engineering*. 1999, **15**(4), 341–346.

Поступила 06.12.10

После доработки 24.01.11

## Summary

The influence of physical and chemical properties of the material of the alloying electrode carbide ВК8 with 1–5 wt. %  $Al_2O_3$  nanopowder for the composition, structure, properties, changes in the surface layer to electro-mechanized hardening of steel 35 with varying frequency and duration of follow electrical impulses were researched. The data obtained can serve as a base for creating a new generation of devices electrical spark coating, special electrode materials, as well as in developing technologies nanostructuring of the surface layers of metallic materials.