

# РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

А.В. Паустовский, Ю.Г. Ткаченко, Р.А. Алфинцева, С.Н. Кириленко, Д.З. Юрченко

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,  
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина, [tkachenko\\_yuri@ukr.net](mailto:tkachenko_yuri@ukr.net)*

## Введение

Проведенные ранее исследования процесса электроискрового упрочнения металлических поверхностей позволили накопить данные о формировании защитного покрытия на поверхности катода и эрозии анода, структурных и фазовых изменениях в электродных материалах, уровне остаточных напряжений и распределении элементов в поверхностном слое покрытий, изучить свойства и эксплуатационные характеристики сформированных градиентных слоев [1–3]. Дальнейшее совершенствование технологии получения таких слоев электроискровым методом связано с более глубоким изучением влияния состояния электродных материалов на интенсивность переноса материала. Искровой разряд происходит в микроскопически малых объемах и длится 100–400 микросекунд [4]. В этом процессе реализуются очень высокие плотности потоков энергии без заметного нагрева обрабатываемого образца. Такой процесс характеризуется существенной неравновесностью и поэтому позволяет получать принципиально новые материалы в поверхностных слоях покрытий, что в обычных равновесных условиях сделать невозможно.

Изучение указанных процессов является основой для решения ряда материаловедческих вопросов, связанных с проблемой повышения эксплуатационных свойств покрытий. Как известно, детали машин, работающие в паре трения, – это, как правило, закаленные конструкционные стали твердостью HRC 40–50 (иногда и больше). Допустимый износ составляет несколько десятых долей миллиметра (изредка больше миллиметра). В связи с этим для восстановления детали необходимо нанести покрытие с соответствующими значениями твердости и толщины. Высокую твердость можно наблюдать и при использовании существующих материалов для электроискрового упрочнения обычной углеродистой стали, но поскольку процесс очень быстрый, то происходит закаливание. Благодаря наличию высоких внутренних напряжений при таком закаливании образуется покрытие толщиной не более 0,1–0,2 мм. Использование для этого процесса сталей, которые не закаляются и не дают соответственно больших внутренних напряжений (например, аустенитных), хоть и позволяет получить покрытие толщиной больше миллиметра, оказывается малоэффективным, поскольку при этом незначительно повышается твердость.

Для решения проблемы эффективного восстановления были разработаны материалы, близкие по составу к материалам, которые используются для наплавки твердых покрытий, – стеллитам и стеллитоподобным материалам. Главное различие в процессах наплавки и электроискрового упрочнения заключается в длительности процесса. Если при наплавке материал находится при высоких температурах (когда происходят микрометаллургические процессы) несколько секунд, то при электроискровой обработке это время на несколько порядков меньше. Как показали исследования, это значительно влияет на процесс формирования покрытия. Оптимизация состава материалов подобного класса позволила решить проблему восстановления изношенных деталей электроискровым методом.

В настоящее время актуальным становится использование в качестве основы электродных материалов неметаллических тугоплавких соединений, в частности нитрида алюминия [5]. При этом наряду с увеличением износостойкости защитных покрытий на металлических поверхностях имеет место повышение стойкости против окисления при высокотемпературных испытаниях. Это особенно заметно при нанесении на титан и его сплавы покрытий из материалов на основе нитрида алюминия.

Разработку материалов для электроискрового легирования проводили в двух направлениях: материалы на металлической основе (стеллитоподобные) для восстановления изношенных деталей из конструкционных сталей, а также материалы с использованием тугоплавких соединений для повышения жаро- и коррозионной стойкости, а также износостойкости титановых сплавов.

## Материалы электродов и способы их получения

Объектами исследований были выбраны:

1. Сплавы систем Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al и Fe-Ni-Si-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, предназначенные для восстановления изношенных деталей из конструкционных сталей.

2. Сплавы системы AlN-MoSi<sub>2</sub>, содержащие 20, 40, 60 и 80 мас.% MoSi<sub>2</sub>, предназначенные для упрочнения и защиты от высокотемпературной коррозии металлических сплавов.

В табл. 1 приведен химический состав сплавов на основе никеля и железа, разработанных для восстановления изношенных деталей.

Для получения электродов указанных составов использовались следующие технологии: плавка (системы Ni-Cr-Al и Fe-Cr-Al), импульсное горячее прессование (системы Ni-Cr-Al и Ni-Cr-NiAl), спекание (системы Ni-Cr-Al, Ni-Cr-NiAl и Fe-Ni-Si-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) и статическое горячее прессование (система AlN-MoSi<sub>2</sub>).

Порошковые смеси для спекания и горячего прессования (импульсного и статического) готовили методом смешивания порошков с одновременным размолотом в планетарной мельнице стальными шарами в среде спирта-ректификата при соотношении порошка и шаров 1:5. Размер частиц порошков после смешивания находился в пределах 2,5–10 мкм.

Спекание образцов размером 50x5x5 мм проводили в вакууме при температуре 1070–1420°C в зависимости от состава. Относительная плотность образцов после спекания составляла 0,85–0,95.

Таблица 1. Состав шихты (масс.%) для сплавов систем Ni-Cr-Al, Ni-Cr-NiAl, Fe-Cr-Al и Fe-Ni-Si-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

Сплав	Ni	Cr	Al	Fe	Si	Mn	C	NiAl	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
4А	50,3	40,2	9,5	–	–	–	–	–	–
4АС1	33	41	–	–	–	–	–	26	–
4АС2	39	35	–	–	–	–	–	26	–
4АС3	32	40	2	–	–	–	–	26	–
ЧХ16 -А	–	18	–	основа	0,73	1,25	3	–	–
ЧХ16 - Б	–	24	–	основа	0,9	0,75	4,2	–	–
Б4	–	28	12	основа	0,85	0,26	1,32	–	–
8С2Х15	8	–	–	основа	2	–	–	–	15
12С2Х15	12	–	–	основа	2	–	–	–	15
12С2Х25	12	–	–	основа	2	–	–	–	25
12С2Х35	12	–	–	основа	2	–	–	–	35
16С2Х15	16	–	–	основа	2	–	–	–	15

Выплавку сплавов проводили в электропечи в алундовых тиглях емкостью 1 кг. В качестве шихтовых материалов для сплавов Fe-Cr-Al использовали сталь 05 КП ДС 1050-88, феррохром ФХ 015 ДС 4757-89, графитовую стружку, алюминиевые отходы кл. А, гр. III, сорт 1 ДС ТУ3211-89. Для сплавов Ni-Cr-Al – никель марки Н-О, хром ЭРХ-0, высокочистый алюминий 9-995. Электроды для электроискрового легирования получали методом отливки стержней диаметром 12–15 мм и длиной 50–60 мм.

Импульсное горячее прессование сплавов Ni-Cr-Al проводили в две стадии: спекание порошковой смеси и последующее прессование в закрытой пресс-форме импульсным ударом под давлением до 1,2 ГПа и при температуре 1250°C [6].

Статическое горячее прессование сплавов системы AlN-MoSi<sub>2</sub> проводили в графитовых пресс-формах при температурах 1740–2000°C (в зависимости от состава композиций) и выдержке 10–15 мин.

### Методики исследований

Электроискровое легирование подложек из конструкционной стали 45, инструментальной стали 30ХГСА, жаростойкого сплава ЖС6К проводили разработанными электродными материалами на основе Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al и Fe-Ni-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> на установках ЭФИ-46А и ЭЛИТРОН-52, а подложки из титанового сплава ВТ6 – сплавами системы AlN – MoSi<sub>2</sub> на установке ЭЛИТРОН-24. Удельное время легирования поверхностей составляло 5 мин/см<sup>2</sup>. В процессе исследования определяли эрозию материала анода Δ<sub>а</sub> (мг), прирост массы катода Δ<sub>к</sub> (мг/см<sup>2</sup>), коэффициент массопереноса  $K = \Delta_k / \Delta_a$ . Иссле-

дование жаростойкости защитных покрытий на стали 45 и сплаве ВТ6 проводили в печи типа СНОЛ при температурах 900, 1000 и 1100<sup>0</sup>С на воздухе и выдержке до 15 ч.

Структуру электродных материалов и свойства поверхностных слоев покрытий исследовали методами оптической микроскопии на приборах МИМ-9 и Neophot-32. ДюрOMETрический анализ материалов и покрытий выполняли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор (0,5–1) Н. Рентгенофазовый анализ проводили на установках "Дрон-3М" с использованием фильтрованного  $K_{\alpha}$  –излучения меди и дифрактометре "ДРОН-2" в излучении железного анода с марганцевым фильтром. Плотность образцов измеряли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах АДВ-200.

Абразивная износостойкость покрытий исследовалась при трении образцов по закрепленному абразиву ДС 17367-71. Испытания проводили при следующих параметрах: давление на образец 0,5 МПа, скорость движения абразивной шкурки 0,4 м/с, длительность испытаний 10 часов (путь трения 14,4 км).

Износ образцов размером 5x5x10 мм в режиме сухого трения скольжения на воздухе при комнатной температуре определяли на машине трения МТ-68 [7] при удельной нагрузке 0,6–2,4 МПа и скорости скольжения 10–20 м/с. Контртела были изготовлены из термообработанной стали 60Г. В ходе исследований фиксировали коэффициент трения  $f$  и интенсивность изнашивания образца  $I$  (мкм/км).

### Результаты исследований

Структура и состав электродных материалов Ni-Cr-Al, полученных разными технологиями, обуславливают закономерности массопереноса при электроискровом легировании поверхности стали 45 и формирование на ней покрытия. Микроструктура литого сплава находится в области тройной эвтектики, а горячепрессованного и спеченного сплавов представляет смесь зерен из фаз  $\alpha$ -,  $\gamma$ - и  $\beta$  –твердых растворов на основе хрома, никеля и NiAl соответственно.

Исследование кинетики процесса электроискрового легирования показало, что коэффициент массопереноса при легировании литым и горячепрессованным сплавами превышает в 2–3,5 раза коэффициент массопереноса спеченных сплавов. Его среднее значение достигает 81,2%.

На рис. 1 представлена структура электроискровых покрытий из сплавов Ni-Cr-Al, полученных различными способами, на подложке из стали 45. Покрытие из литого и горячепрессованного сплавов характеризуется высокой сплошностью, что обеспечивает высокие показатели жаростойкости. Покрытие из спеченного сплава 4АС3 имеет более низкую сплошность по сравнению с покрытием из литого сплава А4. Микротвердость покрытий из литых сплавов достигает значений 8–9 ГПа, горячепрессованных – 7,5–8,8 ГПа и спеченных сплавов – 7,20–8,80 ГПа. Толщина слоя, сформированного при использовании спеченного сплава 4АС3, достигает значений 0,7–1,0 мм (рис. 1,б), что дает основание рекомендовать данный сплав для восстановления изношенных поверхностей деталей.

Исследование кинетики электроискрового легирования сплавами Ni-Cr-Al стальных подложек, а также микроструктуры и износостойкости сформированных покрытий позволило установить, что наиболее эффективным сплавом для восстановления изношенных деталей является сплав из области тройной эвтектики (4А), имеющий состав: Ni-50, 3; Cr-40, 2; Al-9,5 мас.%. Этот сплав был нанесен на образцы из сталей 35, 45 и 30ХГСА, сплавы ЖС6К и ВТ-22. Ранее проведенные исследования [6] показали, что при использовании установки ЭЛИТРОН-52 возможно достичь толщину покрытия до 1 мм. Результаты испытаний на износостойкость в условиях сухого трения приведены в табл. 2.

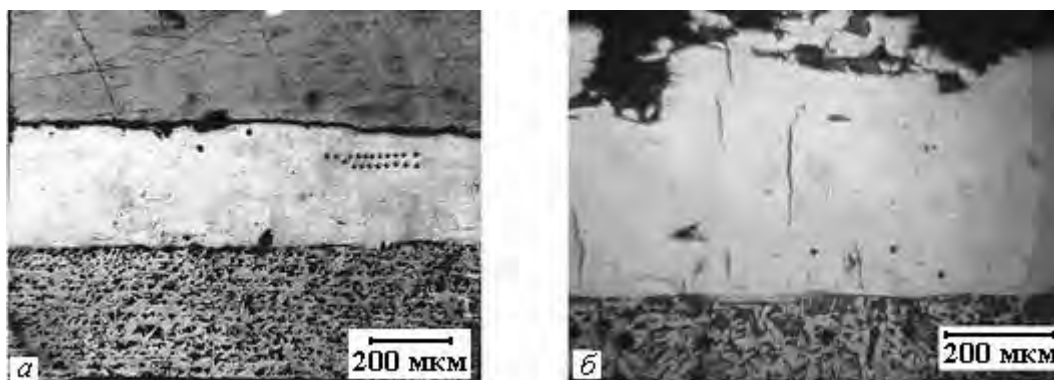


Рис. 1. Микроструктура ЭИ покрытия из литого сплава 4А (а) и спеченного сплава 4АС3 (б) на подложке из стали 45

Таблица 2. Износостойкость металлических подложек и электроискровых покрытий на них из литого сплава Ni-Cr-Al

№ п/п	Материал	HRC	Интенсивность изнашивания $I$ , мкм/км	Коэффициент трения $f$
1	Ni-Cr-Al	60	4,7	0,32
2	Сталь 35	31,0	43,3	0,34
3	Покрытие на стали 35	45	14,2	0,33
4	Сталь 45	32	39,5	0,31
5	Покрытие на стали 45	44	13,9	0,32
6	Сталь 30ХГСА	38	34,6	0,30
7	Покрытие на стали 30ХГСА	43	12,9	0,31
8	Сталь ЖС6К	50	7,3	0,30
9	Покрытие на стали ЖС6К	52,0	5,6	0,32
10	Сплав титана BT-22	21	70,4	0,40
11	Покрытие на сплаве титана BT-22	36	20,3	0,35

Исследование жаростойкости при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  образца из стали 45 и покрытия на нем из сплавов Ni-Cr-Al показало, что окислостойкость покрытий из разработанных материалов в 15–25 раз превышает стойкость против окисления стали 45.

Исследование структуры литых сплавов системы Fe-Cr-Al показало, что в сплаве ЧХ16-А наблюдается структура, характерная для доэвтектических сплавов системы Fe-Fe<sub>3</sub>C. Легирование хромом в количестве 18 мас.% приводит к образованию эвтектики, состоящей из сложного карбида (CrFe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и аустенитной фазы. Сплав ЧХ16-Б имеет типичную структуру заэвтектического состава.

Первичные кристаллы карбида (CrFe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, имеющие форму карандашей, расположены по границам эвтектических колоний карбид – феррит. В сплаве Б4 наблюдается сложная структура, содержащая участки эвтектики (CrFe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> – феррит, включения карбида Fe<sub>3</sub>C, а также интерметаллида Fe<sub>3</sub>Al, имеющего глобулярную форму. Рентгенофазовые исследования выявили дополнительно наличие оксидов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и FeO · Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Наименьший коэффициент массопереноса (0,32) наблюдается при легировании сплавом ЧХ16-Б, более высокое значение коэффициента массопереноса (0,40) получено при легировании сплавом ЧХ16-А. Наиболее высокий коэффициент массопереноса (0,73) наблюдается при электроискровом легировании электродом из сплава Б4. Различие в коэффициентах массопереноса можно объяснить влиянием структурных факторов. Наличие в структуре сплава ЧХ16-Б крупных первичных кристаллов карандашной формы сложного карбида (CrFe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> обуславливает хрупкое разрушение под влиянием электроискрового разряда и переход образовавшихся осколков в продукты эрозии. Такая же закономерность была обнаружена при электроискровом легировании стали 45 литым сплавом Ni-Cr-Al, содержащим большие колонии эвтектики с дендритами NiAl. При легировании электродом такого же состава с мелкозернистой структурой, полученным методом импульсного горячего прессования, коэффициент массопереноса увеличивался до значений 0,8–0,9. В этом случае на увеличение коэффициента массопереноса почти в 1,5 раза при легировании сплавом Б4 оказывает влияние структурный фактор, поскольку этот сплав отличается от двух предыдущих сплавов (ЧХ16-А и ЧХ16-Б) более мелкозернистой структурой. При удельном времени легирования 5 мин/см<sup>2</sup> толщина покрытий достигала 120, 150 и 320 мкм для материалов электродов из сплавов ЧХ16-А, ЧХ16-Б и Б4 соответственно. Увеличение удельного времени легирования (более 5 мин/см<sup>2</sup>) неэффективно, поскольку изменения массы образцов практически не наблюдалось. Исследование износостойкости при абразивном износе проведено на образце с электроискровым покрытием из сплава Б4, толщина которого была максимальна. Абразивный износ составил 15 мкм/км.

Исследование микротвердости электроискрового покрытия из сплава Б4 показало (рис. 2), что микротвердость "белого слоя" достигает значений 7–6,8 ГПа. За "белым слоем" располагается зона термического влияния толщиной 30–50 мкм с микротвердостью 4,3–3,4 ГПа.

Проведенные исследования покрытий из сплавов Fe-Ni-Si-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> показали, что оптимальное содержание Ni в них составляет 12–16%. Больше содержание Ni нецелесообразно по двум причинам: из-за увеличения явлений схватывания при легировании и высокой его стоимости. При меньшем содержании Ni значительно уменьшается перенос материала анода на катод. В связи с этим оптимальное содержание никеля значительно больше, чем в "сормайтах" (1–5%). Оптимальное содержание кремния – 2–3%. Меньшее содержание Si недостаточно для раскисления – покрытие имеет худшее

качество, темный цвет вследствие роста количества оксидов железа. Большое содержание Si положительного эффекта не дает. Изменением содержания карбида хрома регулировали твердость покрытия.

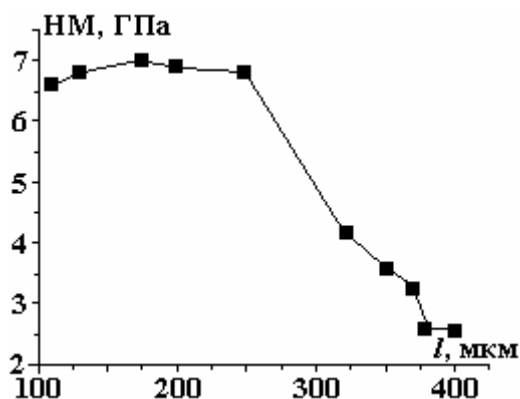


Рис. 2. Распределение микротвердости НМ по глубине электроискрового покрытия из литого сплава Б4 на стали 45

В табл. 3 показана зависимость механических и триботехнических свойств покрытий от состава электродных материалов Fe-Ni- Si- Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Таблица 3. Зависимость свойств покрытий от состава электродных материалов на основе материалов Fe-Ni-Si-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

Электродный материал, мас. %	Толщина покрытия, мм	Твердость НМ, ГПа	Интенсивность изнашивания I, мкм/км	Коэффициент трения f
Сталь 45 (закаленная)	–	–	47,9	0,32
Сормайт С-27	0,7	3,8–4,3	35–45	0,3
Fe+2Si+12Ni+15Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1,8–2,1	3,9–4,3	30	0,28
Fe+2Si+12Ni+25Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1,7–1,9	5–5,5	39–44	0,30
Fe+2Si+12Ni+25Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1,6–1,8	5,3–6,8	37–38	0,32

Электроискровое покрытие, нанесенное разработанными материалами, имеет большие толщину и твердость по сравнению с сормайт С-27, а также значительно меньшее количество дефектов структуры.

Как показали исследования, для восстановления деталей из незакаленной стали или закаленной с высоким отпуском целесообразно использовать сплав с 15% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Для восстановления деталей из закаленной стали со средним отпуском рациональным является использование сплава с 25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Для восстановления деталей из закаленной стали с низким отпуском необходимо использовать электродный материал с 35% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Исследование структуры сплавов AlN-MoSi<sub>2</sub> показало существенные различия в ней в зависимости от содержания MoSi<sub>2</sub>. Так, при содержании 20 и 40 мас. % MoSi<sub>2</sub> структура материалов подобная – для нее характерно равномерное распределение зерен MoSi<sub>2</sub> размером 1–3 мкм в матрице нитрида алюминия. Твердость матрицы при этом составляет 15–18 ГПа. Структура композиций, содержащих 60 и 80% MoSi<sub>2</sub>, сложнее. Основа композиции AlN - 60% MoSi<sub>2</sub> представляет собой нитрид алюминия с включениями дисилицида молибдена с твердостью 10-10,5 ГПа. Основная фаза композиции AlN – 80% MoSi<sub>2</sub> твердостью около 14 ГПа – это дисилицид молибдена с включениями нитрида алюминия. Второй фазой (более 50% по объему) являются квазиэвтектические образования с твердостью около 17 ГПа. Опыты показали, что оптимальным с точки зрения эффективности электроискрового легирования является сплав AlN-60 мас.% MoSi<sub>2</sub>. Была исследована жаростойкость покрытий из этого сплава при изотермической выдержке при температурах 900, 1000 и 1100<sup>0</sup>С.

На рис. 3 представлены кинетические зависимости удельного прироста массы образцов Δm/S с защитными покрытиями из материала AlN – 60% MoSi<sub>2</sub> на сплаве ВТ6, полученные при окислении в среде воздуха при разных температурах. Здесь же для сравнения приведены значения Δm/S для сплава ВТ6 без покрытия.

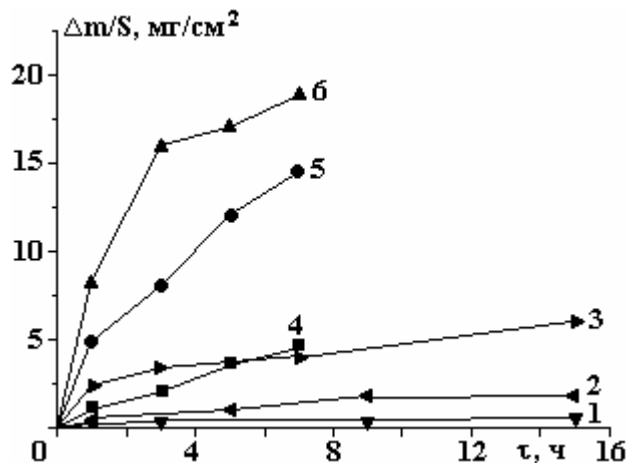


Рис. 3. Кинетическая зависимость прироста массы образцов из титанового сплава BT6 с электроискровым покрытием из материала AlN-60% MoSi<sub>2</sub> (1, 2, 3) и без него (4, 5, 6) при окислении при 900 (1, 4), 1000 (2, 5) и 1100°C (3, 6)

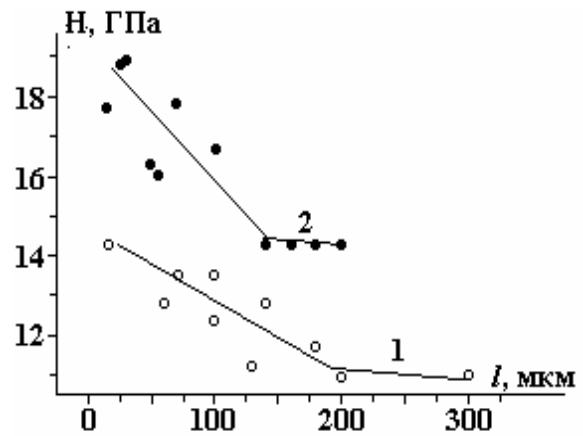


Рис. 4. Распределение твердости  $H$  покрытия из сплава AlN-60% MoSi<sub>2</sub> на титановой подложке по глубине  $l$ : 1 – начальное покрытие, 2 – покрытие после изотермической выдержки

Из приведенных данных видно, что при электроискровом легировании титанового сплава композиционным материалом AlN-60% MoSi<sub>2</sub> жаростойкость титанового сплава существенно повышается. На рис. 4 представлено распределение микротвердости по глубине полученных поверхностных слоев на сплаве BT6.

Рентгенофазовый анализ покрытий из композиционного материала AlN-60% MoSi<sub>2</sub> свидетельствует о наличии в нем жаростойких фаз силицида молибдена – Mo<sub>3</sub>Si, MoSi<sub>0,65</sub>, (Ti<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub>) Si<sub>2</sub>, а также муллитов 3Al<sub>2</sub>O<sub>3,2</sub>SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, алонів Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>z</sub>. Кроме того, в покрытии зафиксировано небольшое количество  $\alpha$ -Ti и TiN.

Опыты показали, что микротвердость поверхностных слоев более чем в два раза превышает твердость титановой подложки, а высокотемпературная выдержка позволила за счет образования твердых жаростойких фаз сформировать защитный слой с твердостью до 18 ГПа и толщиной переходной зоны до 300 мкм.

Разработанные материалы и технологии их изготовления были использованы для повышения срока эксплуатации деталей различных конструкций. Приведем два примера практического использования результатов работы на предприятиях Украины.

На Бериславском механическом заводе (Херсонская обл.) проведено восстановление с одновременным упрочнением корпуса буровой головки КНТУ-110, которая используется для бурения в железной руде шурфов для пиропатронов. Корпус коронки изготовлен из стали 35ХГСА, твердость которой после термообработки составляет 42–45 HRC. В корпус впаяны зубья из сплава BK10. В процессе эксплуатации наиболее интенсивно изнашивается внешняя (цилиндрическая) стальная поверхность коронки. Для упрочнения этой поверхности сплавом 12C2X35 (Fe-2Si-12Ni-35Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) наносилось покрытие толщиной до 1 мм и твердостью 55–59 HRC. Коронка без покрытия проходила 120 м бурения, после нанесения покрытия проходит почти в два раза больше – 225–230 м.

На газоперекачивающей станции (г. Золотоноша, Черкасская обл.) для ремонта газовых компрессоров высокого давления в качестве электродов были использованы износостойкие и жаростойкие эвтектические сплавы Ni-Cr-Al. На изношенные поверхности поршневых колец из серого чугуна СЧ 32–18, которые отработали 9000 часов, были нанесены электроискровые покрытия толщиной 50–60 мкм, и после механической обработки они поставлены вместо новых. Испытания показали, что ресурс работы восстановленных поршневых колец с электроискровыми покрытиями составляет 13000 часов, что почти в 1,5 раза превышает ресурс работы новых колец.

#### Выводы

1. Разработаны новые электродные материалы на основе металлических сплавов систем Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al, Fe-Cr-Ni и тугоплавких соединений (AlN, MoSi<sub>2</sub>) и технологии их изготовления.
2. Показано, что за счет технологии изготовления и состава возможно получить оптимальные с точки зрения эрозионных свойств электродные материалы.
3. Проведенные исследования и практический опыт показали, что использование разработанных электродных материалов в 1,5–2 раза увеличивает срок эксплуатации деталей машин и существенно уменьшает затраты, связанные с ремонтом оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко Ю.Г., Игнатенко Э.П., Бовкун Г.А., Юрченко Д.З. Влияние структуры анода на закономерности электроискрового упрочнения твердыми сплавами. *Электронная обработка материалов*. 1981, (4), 21–24.
2. Бовкун Г.А., Ткаченко Ю.Г., Юрченко Д.З. Безвольфрамовые электродные материалы для электроискрового легирования металлических поверхностей. *Электронная обработка материалов*. 1983, (5), 27–29.
3. Ткаченко Ю.Г., Ковальченко М.С., Бритун В.Ф., Бовкун Г.А., Юрченко Д.З. Получение, свойства и эрозионные характеристики композиционных материалов  $V_4C-Al$ . *Порошковая металлургия*. 2009, (1/2), 78–85.
4. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: "Штиинца", 1985. с. 196.
5. Тепленко М.А., Подчерняева И.А., Панасюк А.Д. и др. Структура и износостойкость покрытий на титановые сплавы и стали, полученных при электроискровом легировании материалом  $AlN - ZrB^2$ . *Порошковая металлургия*. 2002, (3/4), 48–57.
6. Алфинцева Р.А. Бродниковский Н.П., Лаптев А.В. Свойства сплавов  $Ni -Cr-Al$ , полученных методом порошковой металлургии. *Порошковая металлургия*. 2003, (3/4), 35–44.
7. Мамыкин Э.Т., Ковпак А.И., Юга А.И. Комплекс машин и методик определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжении. *Порошковая металлургия*. 1973, (1), 67–72.

Поступила 06.10.10

### Summary

Dependences of developed electrode materials (alloys of systems Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al, Fe-Cr-Ni and  $AlN-MoSi_2$ ) erosive properties from phase structure and manufacturing conditions are studied. Regularities of protective coatings formation, structure and properties are established, giving the basis to development of new effective electrode materials. The structure and manufacturing technology of electrode materials are optimized considering mass transfer intensity during electrospark hardening and properties level (wear resistance and heat resistance). The developed materials are used for increase of various constructions details operation term.

---