

4. *LFA 427* – Laser Flash Apparatus Available at: <http://www.netzsch-thermalanalysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/lfa-427.html>
5. *Duriagina Z. A.* Study of dielectric layers on structural materials formed hybrid ion–plasma discharge system / Z. A. Duriagina, S. A. Bezpalov, V. Ya. Pidkova, D. P. Polotskyi // *Metallofiz. Nov. Tekhnol.* – 2011. – No. 33. – P. 39.
6. *Duriagina Z. A.* Structure peculiarities and properties of magnesium oxide layers formed by a hybrid ion–plasma discharge system / Z. A. Duriagina, V. Ya. Pidkova, S. O. Olshenska // *Func. Mater.* – 2013. – Vol. 20, No. 2. – P. 192–197.
7. *Duriagina Z. A.* Structure of aluminum nitride layers formed by ion–plasma spraying / Z. A. Duriagina, V. Ya. Pidkova // *Mater. Sci.* – 2013. – Vol. 49, No. 3. – P. 74–79.
8. *Pidkova V. Ya.* Structure and properties of Mg, Al, Ti oxide and nitride layers formed by ion–plasma sputtering / V. Ya. Pidkova, I. Brodnikovska, Z. A. Duriagina, V. Petrovskii // *Func. Mater.* – 2015. – Vol. 22, No. 1. – P. 34–39.
9. *Ermolaeva A. I.* Glass formation and properties of glasses in the PbO–ZnO–B₂O₃ system // *Glass Phys. Chem.* – 2001. – Vol. 27, No. 4. – P. 306–314.
10. *Honkamo J.* Microstructural and electrical properties of multicomponent varistor ceramics with PbO–ZnO–B₂O₃ glass addition / J. Honkamo, J. Hannu, H. Jantunen, et al. // *J. Electroceram.* – 2007. – No. 18. – P. 175–18.
11. *Morena R.* Phosphate glasses as alternatives to Pb-based sealing frits // *J. Non-Cryst. Sol.* – 2000. – Nos. 263–264. – P. 382–387.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland
The Rzeszow University of Technology, Rzeszów, Poland
Presidium of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
National Aviation University, Kiev, Ukraine

Submitted
16.02.2016

УДК 621.762:9.048.4:621.788

**В. Б. Тарельник,
А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко, Е. В. Коноплянченко,
В. С. Марцинковский, Б. Антошевский**

ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ И МНОГОСЛОЙНЫЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМ Ni–Cr, WC–Co И МЕТАЛЛОВ

Досліджено метод поширового нанесення на металеву поверхню електроіскрових покриттів із металів групи Cu, In, Pb, Cd, Sn і покриттів із Ti, V, W, карбідів або твердих сплавів типу ВК, що дозволило суттєво підвищити якість і зносостійкість поверхневого шару, порівняно з покриттями без підшару. Встановлено, що спечені електродні матеріали, які складаються з 10–30% (мас.) сплаву Ni–Cr–Si–B та твердого сплаву ВК6, дозволяють формувати електроіскрові покриття товщиною до 100 мкм з мікротвердістю 12,3–14,2 ГПа. Зносостійкість і довговічність таких покриттів істотно вищі, аніж покриттів, отриманих при використанні стандартного твердого сплаву ВК6. Серед сплавів системи Ni–Cr–Al найефективнішим для відновлення зношених деталей є сплав з області потрібної евтектики (50,3% (мас.) Ni, 40,2 Cr, 9,5% (мас.) Al), за допомогою якого можна досягти товщини покриття до 1,0 мм. Застосу-

© В. Б. ТАРЕЛЬНИК, А. В. ПАУСТОВСКИЙ, Ю. Г. ТКАЧЕНКО, Е. В. КОНОПЛЯНЧЕНКО,
В. С. МАРЦИНОВСКИЙ, Б. АНТОШЕВСКИЙ, 2016

вання розробленої технології та запропонованих електродних матеріалів дозволяє збільшити стійкість ріжучих інструментів і довговічність деталей обладнання.

Ключові слова: електроіскрове зміцнення, електродні матеріали, ерозійні властивості, властивості покриттів, зносостійкість, багатошарові покриття.

Введение. Состояние вопроса. Постановка задачи

Совершенствование технологии получения покрытий на металлических поверхностях электроискровым методом во многом связано с более глубоким изучением влияния фазового состава и структуры электродных материалов на интенсивность переноса материала и свойства покрытий. Искровой разряд происходит в микроскопически малых объемах и продолжается 50–400 мс. В этих процессах задействуются очень высокие плотности потоков энергии, а это существенно влияет как на эрозию и перенос электродного материала (анода), так и на свойства формирующегося на катоде покрытия. Изучение указанных процессов является основой для решения целого ряда материаловедческих вопросов, связанных с электроискровым нанесением покрытий, обладающих нужными свойствами.

На сегодняшний день разработка электродных материалов проводится в нескольких направлениях. Одно из них — усовершенствование состава и структуры твердых сплавов (преимущественно на основе карбидов вольфрама и титана) за счет использования сложных металлических связей и исходных ультрадисперсных порошковых смесей, а также прогрессивных методов их консолидации [1, 2]. Другим направлением является разработка электродных материалов на основе сплавов металлических систем и материалов с интерметаллидным упрочнением [3, 4]. Применяются также сплавы систем тугоплавких соединений [5, 6].

Весьма перспективен способ послойного нанесения электроискровым методом на металлическую поверхность как металлов, так и тугоплавких соединений и твердых сплавов. Для повышения износостойкости медного электрода при сварке оцинкованных листов стали на электрод наносили трехслойное покрытие системы (TiC–Ni)–Ni с Ni-подслоем [7]; имеется также опыт нанесения многослойных покрытий на титановый сплав BT3-1 [8].

В целом предыдущие наши исследования [9] показали, что основным принципом создания электродных материалов для износостойких покрытий является гетерогенность их структуры. Одним из вариантов такой структуры является наличие эвтектики, состоящей из твердых растворов на основе металлов (с высокой растворимостью в основе) и фаз с высокой твердостью. Такими являются сплавы системы Ni–Cr–Al, которые по своему фазовому составу соответствуют тройной эвтектике α -, γ - и β -твердых растворов на основе хрома, никеля и Ni–Al соответственно.

Известно, что сплавы на основе Ni–Cr и других добавок, таких как Si, B, Fe, W и Mo, используются для защиты стальных изделий путем припекания шликера, напыления и наплавки покрытий [10–12]. Это позволяет увеличить твердость и стойкость к износу и повышает коррозионную стойкость. При этом следует отметить, что полученные указанными способами покрытия не получили широкого применения из-за плохого сцепления с подложкой. Основной структурной фазой покрытий из сплавов является γ -твердый пересыщенный раствор на основе никеля, а упрочняющими фаза-

ми — бориды хрома и никеля переменных составов. Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1080 °С, а также восстанавливают оксидные пленки на поверхности подложки с образованием боросиликатных шлаков (самофлюсование) в присутствии жидкой фазы и улучшают смачиваемость подложки жидким металлом. Все это подтверждает целесообразность использования сплава Ni–Cr–B–Si в качестве электродного материала при нанесении электроискровых покрытий.

Проведенные нами исследования, в частности [13], показали, что при электроискровом нанесении карбидов, металлов или твердых сплавов на стальную подложку с подслоем из Cu, In, Sn, Cd или Pb износостойкость покрытий, несмотря на существенное снижение микротвердости поверхностного слоя, в 3–6 раз больше, чем у того же покрытия, но без подслоя. При нанесении второго слоя покрытия первоначально нанесенный слой легкоплавкого металла расплавляется и заполняет микронеровности и поры основного покрытия. Кристаллизация второго слоя происходит медленнее вследствие отвода тепла расплавом легкоплавкого металла. Шероховатость поверхности снижается до $R_a = 0,6–0,8$ мкм. Микротвердость электроискрового композиционного покрытия в значительной мере зависит от количества мягкого, более легкоплавкого металла в технологическом подслое. Ранее нами было установлено, что среди металлов наиболее стабильные результаты по массопереносу на металлические поверхности обеспечивают медью. Было также изучено влияние количества меди в композиционном покрытии на микротвердость поверхностного слоя [14].

Все вышеизложенное определило цели данного исследования, а именно:

- разработать электродные материалы на основе систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Si–B и твердых сплавов WC–Co для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных деталей;
- установить закономерности формирования покрытий при электроискровом легировании, в том числе в условиях чередования легирующих электродов для последовательного нанесения на подложку слоев из различных металлов, сплавов и твердого сплава WC–Co, а также изучить свойства покрытий;
- оценить эффективность использования материалов и технологии для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных деталей в промышленных условиях (в частности, для восстановления изношенных шеек валов и посадочных мест под подшипники в корпусах электродвигателей, где необходимы толщина покрытия до 1 мм и достаточная твердость, а также для упрочнения лопаток компрессоров с целью повышения их стойкости к газоабразивному износу).

Объекты и методы исследования

Как базовый состав образцов системы Ni–Cr–Al нами был выбран сплав 50,3% (мас.) Ni; 40,2 Cr; 9,5% (мас.) Al. Этот сплав (далее — сплав 4А) находится в области тройной эвтектики, которая состоит из твердых растворов на основе никеля, хрома и легированного хромом интерметаллида никеля. Сплав 4А был получен тремя различными методами: электродуговой плавкой (ЭП), импульсным горячим прессованием (ИГП) и спекани-

Таблица 1

Состав шихты в сплавах Ni–Cr–Al

Сплав	Содержание элементов, % (мас.)			
	Ni	Cr	Al	NiAl
4А	50,3	40,2	9,5	–
4АС1	33	41	–	26
4АС2	39	35	–	26
4АС3	32	40	2	26

ем смесей порошков в вакууме. Для получения сплава 4А методом спекания как шихтовый материал использовали смеси порошков никеля ПНЕ-1 и хрома ПХМ с дисперсностью 40 мкм, алюминида Ni–Al (ПН70Ю30) с дисперсностью 50 мкм, алюминия марки ПАП-91 дисперсностью менее 10 мкм в пропорциях, соответствующих содержанию никеля, хрома и алюминия в литом сплаве 4А. Были получены смеси трех составов с разным соотношением хрома и никеля (далее — 4АС1, 4АС2 и 4АС3). Содержание компонентов в спеченных сплавах приведено в табл. 1.

Образцы спекали в два этапа. Предварительное спекание проводили в муфельной печи в среде водорода при температуре около 800 °С в течение 2 ч со скоростью подъема температуры 0,06 град/с. Образцы размещали в стальной лодочке в засыпке из прокаленного глинозема с 32%-ной добавкой графитовой стружки. Окончательное спекание проводили в вакуумной печи при вакууме $6,66 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре 1070 °С — это $0,8T_{пл}$ сплава Ni–Cr–Al, составляющей 1240 °С. При таком режиме спекания образцы имели пористость не выше 12%. Рентгеновские исследования выполняли на установке ДРОН-3М с использованием фильтрованного K_{α} -излучения меди.

Смесь 1М (% (мас.) 70 Ni, 20 Cr, 5 Si, 5 В) готовили из порошков Ni, Cr, Si и В с размерами частиц не более 40 мкм. Порошки просушивали в сушильных шкафах при 150–200 °С и просеивали через сито 0075. Готовую твердосплавную смесь ВК6 просушивали в вакууме при 150 °С и просеивали через сито 0075. Затем твердосплавную и самофлюсующуюся смеси загружали в смеситель в следующих соотношениях: 100% 1М; 50% ВК6–50% 1М; 60% ВК6–40% 1М; 70% ВК6–30% 1М; 80% ВК6–20% 1М; 90% ВК6–10% 1М; 100% ВК6, — и подвергали совместному сухому механическому смешиванию в течение 24 ч. Приготовленные смеси замешивали с пластификатором (5%-ный раствор синтетического каучука в бензине). Образцы необходимых размеров прессовали в металлических пресс-формах под давлением 70–100 МПа и спекали при 1400–1500 °С в водороде. Изготовленные таким образом электроды служили для нанесения электроискровых покрытий на образцы сталей 45 и Р6М5 (установка УИЛВ-8 в 5-м режиме при энергии разряда $W_u = 0,42$ Дж). Предварительные слои из индия и меди наносили, соответственно, во 2-м и 3-м режимах этой же установки при $W_u = 0,015$ и $0,02$ Дж и времени легирования $T = 5$ и 4 мин/см².

При разработке покрытий для защиты рабочих колес центробежных компрессоров от газоабразивного износа были проведены лабораторные

Таблица 2

Привес образцов из стали 45, легированных медью

Емкость накопительного конденсатора C , мкФ	Ток короткого замыкания $J_{к.з.}$, А	Энергия разряда W_u , Дж	Привес Cu , мг/см ²
20	0,2–0,4	0,01	2,85
20	0,5–0,6	0,02	5,13
300	1,6–2,0	0,24	11,53
300	2,0–2,2	0,42	15,63

испытания на износостойкость в газоабразивной струе покрытий на образцах листовой стали 30ХГС с размером 100 мм × 50 мм × 6 мм. Образцы испытывали в пескоструйных камерах, работающих от воздушной магистрали с давлением 600 кН/м². Абразивом служил кварцевый песок с диаметром частиц 0,2 мм. Образцы устанавливали под сопло аппарата на специальных подставках под углами атаки 90 и 45°. Для сравнения испытывали образцы с покрытием (по три образца на серию) и эталонные образцы из термообработанной стали 30ХГС без покрытия с твердостью НВ = 296–302. Износостойкость образцов оценивали по потере веса.

Чтобы установить влияние количества меди в композиционных покрытиях на структуру и микротвердость, на термообработанные до уровня твердости 2,8 ГПа образцы из стали 45 с размером 10 мм × 10 мм × 10 мм при разных режимах легирования на установке УИЛВ-8 наносили медь. Время легирования образцов составляло 1 мин/см². Кинетику массопереноса изучали гравиметрически с точностью 10⁻⁵ г. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 2.

На все образцы в 5-м режиме при $W_u \approx 0,42$ Дж вторым слоем наносили твердый сплав ВК8 при $T = 1$ мин/см². Затем на профилографе-профилометре (модель 201 производства завода “Калибр”) измеряли шероховатость сформированных покрытий, на оптическом микроскопе “Неофот-2” проводили металлографические исследования. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя измеряли на микротвердометре ПМТ-3 путем вдавливания алмазной пирамиды под нагрузкой 0,5 Н.

Износостойкость металлорежущего инструмента (из быстрорежущей стали Р6М5), упрочненного электроискровым методом электродами из твердого сплава ВК6 и сплава 1М в различных соотношениях, исследовали непосредственно в условиях производства.

Результаты исследования и их обсуждение

Электродные материалы и покрытия из сплавов системы Ni–Cr–Al. Сплавы на основе никеля традиционно содержат основные легирующие элементы — хром и алюминий, поэтому в системе Ni–Cr–Al образуется упрочняющая фаза — алюминиды никеля, легированные хромом, которые обеспечивают высокие показатели прочности и жаростойкости сплавов. Основным условием создания сплавов этой системы для электроискровых покрытий на конструкционных сталях является наличие в них эвтектических структур, содержащих как твердые растворы на основе металлов с высокой растворимостью в легированной подложке (железе), так и интер-

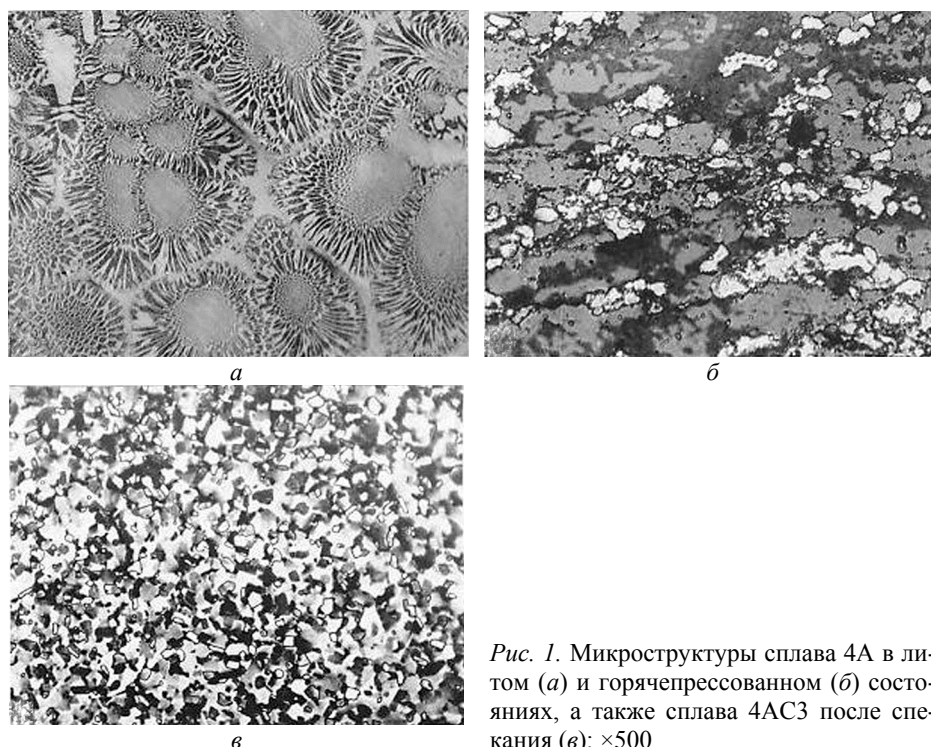


Рис. 1. Микроструктуры сплава 4А в литом (а) и горячепрессованном (б) состояниях, а также сплава 4АС3 после спекания (в); $\times 500$

металлидные фазы (NiAl , Ni_3Al и Ni_2Al_3) с высокой твердостью. Использование таких электродов в дальнейшем обеспечивает формирование покрытий с гетерофазной структурой, которым присущи высокая прочность сцепления с подложкой, износостойкость и жаростойкость.

Были исследованы структура и фазовый состав электродных материалов Ni-Cr-Al в зависимости от технологии их изготовления. Микроструктуры сплавов в разных состояниях представлены на рис. 1.

Микроструктура литого сплава отвечает тройной эвтектике (рис. 1, а), а у горячепрессованного и спеченного (рис. 1, б, в) — это смесь зерен α -, γ - и β -твердых растворов на основе хрома, никеля и NiAl соответственно. Рентгеноструктурные исследования показали, что параметр ГЦК-решетки γ -твердого раствора на основе никеля достигает 0,3582 нм, что превышает параметр решетки никеля (0,3520 нм). Это свидетельствует о том, что в никеле растворены хром и алюминий, которые имеют большие атомные радиусы ($r_{\text{Cr}} = 0,128$ нм, и $r_{\text{Al}} = 0,143$ нм, тогда как $r_{\text{Ni}} = 0,124$ нм).

Параметр ОЦК решетки α -твердого раствора на основе хрома достигает 0,2895 нм (хотя в нем растворяется никель, имеющий меньший атомный радиус, чем хром) за счет алюминия, так как его растворимость в хrome больше, чем в никеле. Параметр ОЦК-решетки алюминид никеля равен 0,2879 нм.

Кинетические зависимости эрозии анода Δ_a и прироста массы катода Δ_k сплавов Ni-Cr-Al изучали при электроискровом легировании стальной подложки спеченными сплавами на установке ЭФИ-46А в течение 10 мин (рис. 2). Эрозия спеченных сплавов (рис. 2, а, б) в 2–4 раза выше, чем у литого и горячепрессованного 4А (рис. 2, в, г). При этом прирост массы катода при легировании спеченным сплавом (4АС2) мало отличается от приро-

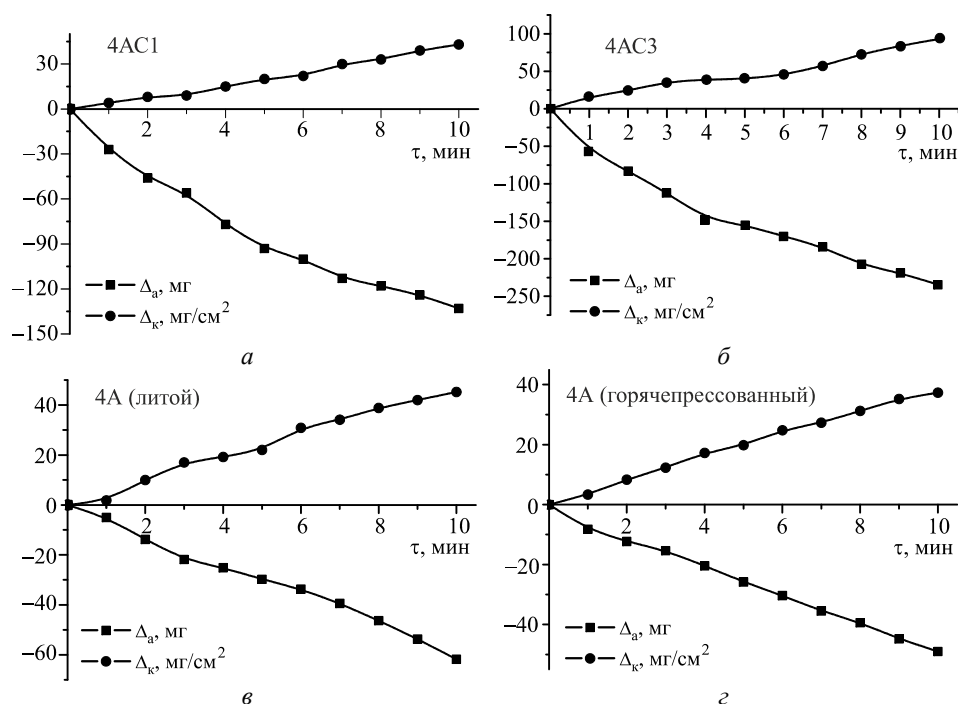


Рис. 2. Кинетические зависимости эрозии анода Δ_a и прироста массы катода Δ_k при электроискровом легировании стали 45 различными сплавами

ста массы катода при легировании литым и горячепрессованным сплавом (4A). В нашем случае электроды имеют один и тот же элементный состав, но отличаются характером структуры (рис. 1), что обусловлено технологией их изготовления. Различие в исходной микроструктуре электродов и пористости обуславливает разницу в значениях эрозии.

Высокая эрозия спеченных сплавов объясняется слабой связью между отдельными фрагментами структуры, вследствие чего происходит более сильное разрушение при электроискровом импульсе. Коэффициент переноса Δ_k/Δ_a в зависимости от состава и способа получения материала электрода изменяется от 0,2 для сплава 4AC1 до 0,8 для литого и горячепрессованного 4A. Монотонный рост массы катода в течение процесса легирования свидетельствует о том, что за 10 мин нанесения материала порог хрупкого разрушения поверхностного слоя не был достигнут. Толщина поверхностного слоя (0,7–1,0 мм) позволяет рекомендовать данный материал для восстановления изношенных поверхностей деталей. Покрытия из литых и горячепрессованных сплавов имеют высокую сплошность. Микротвердость покрытий из литых сплавов достигает 8–9 ГПа, из горячепрессованных — 7,5–8,8 ГПа, спеченных — 7,2–8,8 ГПа.

Исследования микроструктуры, износостойкости и кинетики электроискрового легирования электродами из сплавов системы Ni–Cr–Al позволили установить, что наиболее эффективным для восстановления изношенных деталей является сплав 4A из области тройной эвтектики (50,3% (мас.) Ni; 40,2 Cr; 9,5% (мас.) Al). Этот сплав и был нанесен на образцы из сталей 35, 45 и 30ХГСА, а также сплавов ЖС6К и ВТ-22. Установлено, что при использовании режима “0” ($W_u = 7,5$ Дж) на установке ЭЛИТРОН-52

можно достичь толщины покрытия 1,0 мм. Результаты испытаний на износостойкость в условиях сухого трения приведены в табл. 3. Наибольшую износостойкость имеет материал электрода 4А. Как видно, при использовании электрода из сплава 4А были получены покрытия с износостойкостью, которая в 2,8–3,5 раза превышает износостойкость подложек.

Таблица 3

Износостойкость сталей без покрытия и с электроискровым покрытием из литого сплава 4А

Вид поверхности	Твердость <i>HRC</i>	Интенсивность изнашивания <i>I</i> , мкм/км	Коэффициент трения <i>f</i>
Сплав 4А	60	4,7	0,32
Сталь 35	31	43,3	0,34
Покрытие на стали 35	45	14,2	0,33
Сталь 45	32	39,5	0,31
Покрытие на стали 45	44	13,9	0,32
30ХГСА	38	34,6	0,30
Покрытие на 30ХГСА	43	12,9	0,31
ЖС6К	50	7,3	0,30
Покрытие на ЖС6К	52	5,6	0,32
ВТ-22	21	70,4	0,40
Покрытие на ВТ-22	36	20,3	0,35

Таблица 4

Свойства электроискровых покрытий, содержащих сплавы 1М (Ni–Cr–Si–B) и ВК6

Материал покрытия, % (мас.)	Толщина слоя, мкм	Микротвердость H_{μ} , ГПа	Сплошность, %
Сталь 45			
ВК6–50 1М	5–50	8,9	75
ВК6–40 1М	5–45	11,5	75
ВК6–30 1М	10–40	12,3	75
ВК6–20 1М	10–40	13,25	80
ВК6–10 1М	10–40	14,2	80
ВК6	10–30	12,5	80
1М	40–75	8,35	60
Cu–1М	20–25	6,03	85
In–(ВК6–10 1М)	15–20	13,25	90
Р6М5			
1М	50–75	11,5	90
ВК6–50 1М	40–50	12,0	70
ВК6–40 1М	30–40	12,5	75
ВК6–30 1М	25–35	13,0	80
ВК6–20 1М	25–35	13,5	80
ВК6–10 1М	20–30	14,2	85
In–1М	10–15	12,25	90
In–(ВК6–10 1М)	15–20	13,25	90

На предприятии “Укрметаллургремонт” (г. Каменское) в промышленных условиях электродный материал из сплава Ni–Cr–Al был использован для электроискрового нанесения покрытий при восстановлении посадочных поверхностей осей крановых тележек мостовых кранов и посадочных отверстий под подшипники в крышках электродвигателей.

Электродные материалы и покрытия из сплавов системы (Ni–Cr–SiB)–ВК6. Некоторые свойства электроискровых покрытий на сталях 45 и Р6М5, полученных с использованием спеченных электродов ВК6–1М(Ni–Cr–Si–В), представлены в табл. 4.

Опыты показали, что применение электродов, содержащих 10–30% (мас.) 1М и твердый сплав ВК6, позволяет формировать поверхностный слой с микротвердостью 12,3–14,2 ГПа. Подслой из индия, снижая шероховатость покрытия 10% 1М–ВК6 с $R_a = 3,5–4,2$ до $R_a = 0,6–0,9$ мкм и увеличивая сплошность с 80 до 90%, уменьшает его микротвердость до 13,25 ГПа. Сплав 1М позволяет формировать покрытия толщиной до 75 мкм с микротвердостью до 8,35 ГПа.

На рис. 3 показаны поперечные сечения покрытий на стали 45. На срезах покрытий видно, что они представляют собой в основном беспористый

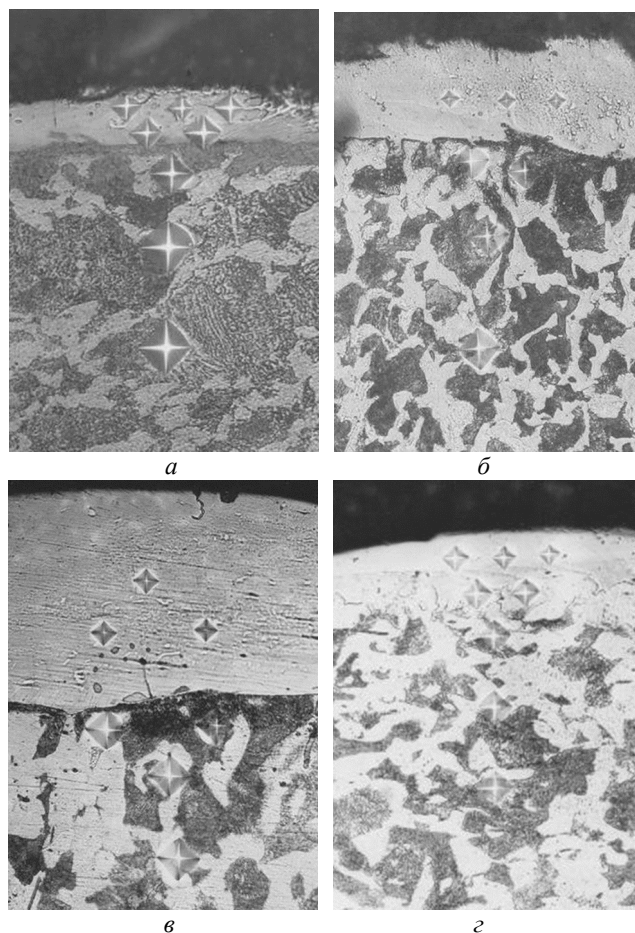


Рис. 3. Поперечные сечения электроискровых покрытий из электродов на стали 45: а — ВК6–40% 1М; б — ВК6–20% 1М; в — 1М; г — In–(ВК6–10% 1М); $\times 400$

Таблица 5

Результаты сравнительных испытаний на газоабразивный износ образцов из стали 30ХГСА с покрытиями и без них

Материал покрытия, %	Потеря веса, г	Время испытания, ч	Угол атаки, град
Без покрытия	51	1	45
Без покрытия	38	1	90
ВК6	29	1	45
ВК6	21	1	90
T15K6	23	1	45
T15K6	17	1	90
1М	27	1	45
1М	20	1	90
ВК6 + 10 1М	16	1	45
ВК6 + 10 1М	11	1	90

слой толщиной от 25 до 75 мкм в зависимости от состава. Изредка заметны цепочки мелких пор, в том числе в слое, примыкающем к стальной подложке (этот слой на рисунках имеет темный цвет). Имеются также участки, где подслой отсутствует (рис. 3, *а–в*), в частности при нанесении подслоя из индия (рис. 3, *г*). Микротвердость всех покрытий повышается с приближением к поверхности.

Данные о газоабразивном износе образцов из стали 30ХГСА как без покрытия, так и с покрытиями из сплавов 1М и 1М-ВК6, а также стандартных твердых сплавов ВК6 и Т15К6 в пескоструйных камерах представлены в табл. 5. Упрочнение образцов проводили на установке УИЛВ-8 с ручным вибратором при $W_u = 0,42$ Дж и $T = 1$ мин/см².

Испытания показали, что стойкость к эрозионному износу образцов из стали 30ХГСА с покрытием ВК6–10% 1М в 3,5 раза выше, чем без покрытия, и 1,9; 1,5 и 1,7 раза выше, чем у образцов, упрочненных сплавами, соответственно, ВК6, Т15К6 и 1М. Износостойкость образцов, расположенных под углом атаки 90°, выше, чем у образцов, расположенных под углом атаки 45°.

Сформированные с использованием электродов из ВК6–1М покрытия нашли применение на Северодонецком ПО “Азот” при ремонте воздушного компрессора КВД модели 2МCL-456 фирмы “Хитачи” (Япония). Сложность и большая стоимость изготовления рабочих колес центробежных компрессоров обуславливают необходимость продления ресурса их работы. В большинстве случаев рабочие колеса выходят из строя по причине газоабразивного износа оснований лопаток. Это связано с условиями работы колес: атмосферный воздух, содержащий абразивные частицы; 100%-ная относительная влажность; давление на входе в первое рабочее колесо — 0,7 МПа; частота вращения ротора — 10500 об/мин; окружная скорость — 258 м/с. Соударяясь с входной кромкой лопаток колеса, абразивные частицы выкрашивают частицы металла из поверхностного слоя лопаток, образуя каверны, которые, развиваясь со временем, приводят к значительному вымыванию металла путем образования ручьев и прорезей. Известны случаи, когда рабочий диск полностью отрезался от остальной части колеса, и это приводило к тяжелейшим авариям. Даже незначитель-

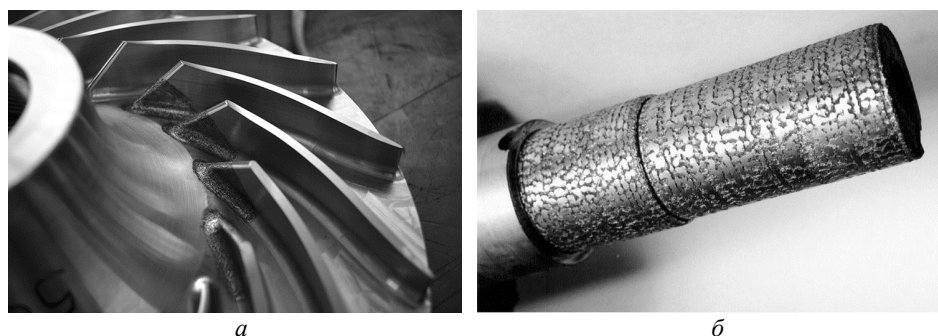


Рис. 4. Рабочее колесо компрессора после электроискрового упрочнения (а) и шейки вала ротора электродвигателя после электроискрового восстановления их размеров (б)

ный износ лопатки приводит к потере производительности компрессора, а дальнейшее изнашивание влечет за собой его полную остановку.

На входные кромки и прилегающие части поверхностей лопаток рабочих колес было нанесено износостойкое покрытие (рис. 4, а). В качестве электрода использовали композиционный материал ВК8–10% 1М, обеспечивающий высокую стойкость к газоабразивному износу. Толщина сформированного покрытия составила 80–100 мкм, а микротвердость — 14,0 ГПа (при твердости основы 4,0 ГПа), что позволило повысить стойкость лопаток и уменьшить затраты на их ремонт. В целом же годовой экономический эффект от внедрения разработки уже составил 27 тыс. грн. только на одном компрессоре.

Чтобы найти оптимальный материал покрытия для металлорежущего инструмента, в АО “Сумское машиностроительное научно-производственное объединение” испытывали концевые фрезы (диаметр 36 мм) из стали Р6М5 путем фрезерования пазов в диске рабочих колес из стали 09ХА15Н8Ю на станке модели 654Ф3 с числовым программным управле-

Таблица 6

Результаты сравнительных производственных испытаний стойкости концевых фрез при обработке стали 09ХА15Н8Ю

Материал электрода, %	Количество обработанных деталей	Коэффициент увеличения стойкости
—	1,0	—
ВК6–30 1М	3,0	3,0
ВК6–30 1М	3,1	3,1
ВК6–30 1М	3,2	3,2
ВК6–20 1М	3,5	3,5
ВК6–20 1М	3,5	3,5
ВК6–20 1М	3,6	3,6
ВК6–10 1М	4,0	4,0
ВК6–10 1М	4,2	4,2
ВК6–10 1М	4,1	4,1
ВК6	1,7	1,7
ВК6	1,9	1,9
ВК6	2,0	2,0

нием. Фрезы упрочняли на установке УИЛВ-8 при $W_p = 0,42$ Дж. Следует учесть, что из-за большого объема обработки фрезой до затупления на одном рабочем колесе можно обработать небольшое количество дисков. Результаты испытаний показали (табл. 6), что применение композиционных электродов ВК6–10% 1М для упрочнения фрез позволяет значительно увеличить их стойкость, которая более чем вдвое превышает стойкость фрез, упрочненных стандартным сплавом ВК6.

Многослойные композиционные электроискровые покрытия (КЭП). Были исследованы особенности формирования покрытий на образцах из стали 45, на поверхность которых предварительно наносили слой меди, а затем, при энергии разряда 0,42 Дж и $T = 1$ мин/см², — слой твердого сплава ВК8. Полученные данные представлены в табл. 7.

Наши опыты показали, что с повышением мощности искрового разряда возрастает количество меди в подслое, снижается агрегатная микротвердость поверхностного слоя, увеличивается шероховатость, толщина упрочненного слоя составляет 30–50 мкм. Микротвердость покрытия достаточно высокая — до 10 ГПа. При электрической эрозии не только расплавленный, но и размягченный материал анода вследствие соответствующих тепловых и электродинамических процессов выбрасывается в межэлектродный промежуток. Часть выброшенного в межэлектродное пространство материала достигает катода и взаимодействует с его поверхностью [15]. А поскольку медь более легкоплавка, чем компоненты анода, на стальной подложке образуется слой механической смеси Cu с анодным материалом, и этим объясняется большой разброс значений микротвердости в поверхностном слое. На поверхности покрытия находится пленка меди толщиной 1–2 мкм, и все сформированные таким образом покрытия имеют характерный медный цвет (медь как на поверхности, так и в глубине покрытия выявляется рентгенофазовым анализом). При такой последовательности формирования слоев (Cu–ВК8) первоначально нанесенное покрытие из меди расплавляется, когда наносится слой сплава WC–Co. Расплавленной медью заполняются микронеровности и поры основного покрытия. Кристаллизация второго слоя проходит медленнее вследствие отвода тепла расплавом меди, и при этом шероховатость поверхности снижается до $R_a = 0,5–0,9$ мкм.

Таблица 7

Толщина, микротвердость и шероховатость КЭП на стали 45 с различным содержанием меди в подслое* в процессе электроискрового легирования (ЭИЛ)

W_u , Дж	Привес Cu, мг/см ²	Толщина, мкм		Микротвердость, ГПа		R_a , мкм
		слоя	переходной зоны	слоя	переходной зоны	
0,01	2,846	10–20	20	3,8–4,4	2,2–2,6	1,8
0,02	5,126	15–25	25	8,5–10,4	2,3–3,6	0,5
0,24	11,53	15–20	10	5,3–6,4	2,0–3,7	0,6
0,42	15,63	10–20	20	4,3–4,8	1,9–2,3	0,8
0,02*	2,317*	15–30	5–10	2,5; 11,5	3,3–4,3	2,4

* Покрытие из меди наносили вторым слоем после ВК8.

Таблица 8

Микротвердость и шероховатость КЭП

Материал покрытия	Микротвердость, ГПа		Шероховатость поверхности R_a , мкм
	слоя	переходной зоны	
Сталь 45 без покрытия	2,8	—	0,23
Ti	10,8; 9,6	3,7; 3,1	2,81
Ti-Cu	2,5; 9,5	3,6; 3,12	2,80
Cu-Ti	10,5	4,8; 3,7	0,90
V	8,5; 7,3	3,8; 3,3	3,19
V-Cu	2,3; 8,2	3,8; 3,3	2,80
Cu-V	8,4; 7,8	3,9; 3,3	0,80
W	9,5; 8,2	3,8; 3,4	3,26
W-Cu	2,5; 8,1	4,3; 3,6	3,14
Cu-W	9,5; 9,1	3,7; 3,2	0,65
WC	12,5; 11,0	4,7; 3,3	2,96
WC-Cu (1)	2,35; 12,3	4,19; 3,3	2,81
WC-Cu (2)	11,5; 10,49	4,76; 2,86	2,81
Cu-WC	12,3; 10,49	3,57; 3,3	0,48
In-WC	1,97; 2,5	3,86; 3,57	0,52
Pb-WC	2,6; 3,97	3,7; 3,3	0,56
Cd-WC	2,3; 3,8	3,6; 3,3	0,77
Sn-WC	2,0; 3,5	4,2; 3,1	0,59

Для сравнения на один из образцов наносили композиционное покрытие в обратной последовательности ВК8–Cu. В этом случае микротвердость на глубине до 30 мкм составляет 2,3–2,5 ГПа. Ниже, по мере углубления, находится слой толщиной 5–10 мкм с более высокой микротвердостью (8,0–12,3 ГПа), а далее — переходная зона с микротвердостью 3,3–4,3 ГПа. Встречающиеся на поверхности покрытия участки с высокой микротвердостью — это вершины выступов ранее нанесенного покрытия из твердого сплава ВК8. Шероховатость сформированных покрытий ВК8–Cu достигает 2,4 мкм.

Были изучены также свойства композиционных покрытий из Ti, V, W и WC на стали 45. Их наносили в различной последовательности с подслоями из Cu, In, Pb, Cd и Sn (технологический подслои — при $W_u = 0,02$ Дж и $T = 4–5$ мин/см²; материал основного покрытия — при 0,42 Дж и 1 мин/см² соответственно). Результаты исследований представлены в табл. 8. Толщина КЭП вместе с переходной зоной составляет 40–50 мкм.

Композиционные покрытия были сформированных по схеме ВК8–Cu–ВК8. При этом первый слой из твердого сплава ВК8 наносили во всех случаях при $W_u = 0,4$ Дж, а второй (медный) и третий (тоже из ВК8) — в различных режимах. Установлено, что во всех трех покрытиях микротвердость поверхностного слоя H_u находится на достаточно высоком уровне (6,42–8,74 ГПа), шероховатость — низкая ($R_a = 0,5$ мкм). Резкие перепады микротвердости в переходной зоне отсутствуют, микротвердость от максимальной на поверхности плавно снижается по мере углубления до твердости основного металла. Установлено, что оптимальным является тот вариант покрытия, когда первый и третий слои из ВК8 наносят при $W_u =$

$= 0,4$ Дж и $T = 1$ мин/см², а медь — при $0,24$ Дж и $1,5$ мин/см² соответственно.

Полученные в ходе исследования результаты позволили решить целый ряд практических задач. Так, технология получения покрытий Cu–BK8 и BK8–Cu–BK8 с их дальнейшей поверхностной пластической обкаткой роликом уже использована для восстановления шеек вала ротора электродвигателя, являющихся посадочным местом под подшипник (рис. 4, б). Шейки были восстановлены в размер (с учетом припуска на шлифовку $0,4\text{--}0,5$ мм на диаметр) с применением электроискровой технологии и обкатки роликом. При этом нанесение слоев покрытий чередовалось с обкаткой роликом. Обкатка роликом производилась на токарном станке пружинно-штоковым приспособлением с профильным радиусом 4 мм. Удельное усилие выглаживания составляло 3000 МПа. Это позволило изменить остаточные напряжения в поверхностном слое покрытия с растягивающих на сжимающие, снизить шероховатость поверхности покрытия до $R_a = 0,1$ мкм, повысить усталостную прочность и износостойкость вала [16]. Разработанная технология ремонта и упрочнения шеек валов внедрена на Угледорской и Мироновской ГРЭС с организацией участков в ремонтных цехах.

Выводы

Исследования микроструктуры, износостойкости и кинетики электроискрового легирования сталей электродами из сплавов системы Ni–Cr–Al позволили определить, что наиболее эффективным для восстановления изношенных деталей является сплав из области тройной эвтектики ($0,3\%$ (мас.) Ni; $40,2$ Cr; $9,5\%$ (мас.) Al), с помощью которого можно достичь толщины покрытия $1,0$ мм.

Спеченные электродные материалы $10\text{--}30\%$ (мас.) 1М (Ni–Cr–Si–B)–BK6 позволяют формировать электроискровые покрытия с толщиной до 100 мкм и микротвердостью $12,3\text{--}14,2$ ГПа, причем износостойкость и долговечность таких покрытий существенно выше, чем тех, которые получены с использованием стандартного твердого сплава BK6.

Способ послойного нанесения на металлическую поверхность (при условии соблюдения отработанных технологических параметров) электроискровых покрытий из металлов Cu, In, Pb, Cd и Sn и покрытий из Ti, V и W, а также их карбидов и твердых сплавов типа BK повышает (по сравнению с покрытием без подслоя) качество формируемого поверхностного слоя: в нем одновременно достигается достаточная твердость, уменьшаются шероховатость и пористость, увеличивается сплошность.

На стальных подложках многослойные покрытия BK8–Cu–BK8 имеют микротвердость поверхностного слоя в диапазоне $6,42\text{--}8,74$ ГПа, которая плавно уменьшается по мере углубления, достигая твердости основного металла; шероховатость поверхности $R_a = 0,5$ мкм.

Проведенные исследования и практический опыт показали, что применение разработанной технологии и новых электродных материалов позволяет увеличить стойкость режущих инструментов и долговечность деталей оборудования минимум в 4 раза, по сравнению с неупрочненными, и в 2 раза — по сравнению с упрочненными стандартными твердыми сплавами типа BK.

Исследован способ послойного нанесения на металлическую поверхность электроискрового покрытия из металла группы Cu, In, Pb, Cd, Sn и покрытия из Ti, V, W, карбидов или твердых сплавов типа ВК, что позволило повысить качество и износостойкость формируемого поверхностного слоя по сравнению с покрытием без подслоя. Установлено, что спеченные электродные материалы, состоящие из 10–30% (мас.) сплава Ni–Cr–Si–B и твердого сплава ВК6, позволяют формировать электроискровые покрытия толщиной до 100 мкм и микротвердостью 12,3–14,2 ГПа. Износостойкость и долговечность таких покрытий существенно выше, чем покрытий из стандартного твердого сплава ВК6. Среди сплавов системы Ni–Cr–Al наиболее эффективным для восстановления изношенных деталей является сплав из области тройной эвтектики (50,3% (мас.) Ni; 40,2 Cr, 9,5% (мас.) Al), с помощью которого можно достичь толщины покрытия до 1,0 мм. Применение разработанной технологии и предложенных электродных материалов позволяет увеличить стойкость режущих инструментов и долговечность деталей оборудования.

Ключевые слова: электроискровое упрочнение, электродные материалы, эрозийные свойства, свойства покрытий, износостойкость, многослойные покрытия.

The layer-by-layer electrospark coating of metal surfaces by Cu, In, Pb, Cd, and Sn group metals, as well as by Ti, V, W, carbides, and hard alloys of WC type is studied. This method allows improvement in the quality and wear resistance of the surface layer in comparison with surfaces without a sublayer. It is found that the sintered electrode materials with 10–30 wt.% of the (Ni–Cr–Si–B)–WC6 alloy permit forming electrospark coatings with thickness up to 100 μm and microhardness 12.3–14.2 GPa. The wear resistance and durability of these coatings are substantially higher than those of standard WC hard alloy coatings. Among the Ni–Cr–Al alloys, the best effectiveness in worn-part recovery is shown by an alloy from the three-component eutectic area (50.3 wt.% Ni, 40.2 wt.% Cr, 9.5 wt.% Al), which may provide coating thickness up to 1.0 mm. The novel coating method and proposed electrode materials allow increase in the resistance of cutting tools and durability of equipment parts.

Keywords: electrospark hardening, electrode materials, erosion properties, coating properties, wear resistance, multilayer coatings.

Список литературы

1. Wang R. J. Structural and interfacial analysis of WC92–Co8 coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition / R. J. Wang, Y. Y. Qian, J. Liu // Appl. Surf. Sci. – 2004. – Vol. 228, No. 4. – P. 405–409.
2. Ткаченко Ю. Г. Структура и свойства износостойких электроискровых покрытий при использовании в качестве анода карбидтитановых твердых сплавов / Ю. Г. Ткаченко, Д. З. Юрченко, В. Ф. Бритун и др. // Порошковая металлургия. – 2013. – № 5/6. – С. 86–96.
3. Гадалов В. Н. Износо- и коррозионностойкие электроискровые покрытия из эвтектических сплавов на стали 30ХГСА / В. Н. Гадалов, Ю. В. Болдырев, Е. В. Иванова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 1. – С. 22–25.
4. Паустовский А. В. Оптимизация состава, структуры и свойств электродных материалов и электроискровых покрытий при упрочнении и восстановлении металлических поверхностей / А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко, Р. А. Алфинцева и др. // Электрон. обраб. материалов. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 4–13.
5. Ковальченко М. С. Структура, механические и эрозийные свойства композиционных материалов системы AlN–MoSi₂ и электроискровых покрытий на их основе / М. С. Ковальченко, Ю. Г. Ткаченко, В. Ф. Бритун и др. // Порошковая металлургия. – 2008. – № 3/4. – С. 37–46.
6. Подчерняева И. А. Закономерности массопереноса и адгезионное взаимодействие при электроискровом легировании сплава АЛ9 керамическими электродами AlN–Ti(Zr)B₂–Ti(Zr)Si₂ / И. А. Подчерняева, Д. В. Юречко, А. Д. Панасюк // Там же. – 2004. – № 9/10. – С. 43–50.

7. *Chen Z.* Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings. Part I: Coating characterization / Z. Chen, Y. Zhou // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – Vol. 201, No. 3–4. – P. 1503–1510.
8. *Подчерняева И. А.* Особенности формирования и трибологического поведения многослойных износостойких ZrB₂-содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве / И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. И. Духота и др. // *Пробл. трибологии.* – 2012. – № 4. – С. 96–101.
9. *Паустовский А. В.* Разработка электродных материалов для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных поверхностей, структура и свойства покрытий / А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко, Р. А. Алфинцева и др. // *Электрон. обраб. материалов.* – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 30–36.
10. *Смирнов А. Н.* Влияние нанодисперстных частиц Al₂O₃ на структурно-фазовое состояние покрытий системы Ni–Cr–B–Si–Fe/WC, полученных плазменно-порошковой наплавкой / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, М. В. Радченко и др. // *Сварка и диагностика.* – 2012. – № 5. – С. 32–37.
11. *Погребняк А. Д.* Структура и свойства покрытия из Ni–Cr–B–Si–Fe/WC–Co, нанесенного на подложку из стали и меди / А. Д. Погребняк, С. Н. Братушка, В. В. Углов и др. // *Физ. инженерия поверхности.* – 2008. – Т. 6, № 1–2. – С. 92–97.
12. *Иванов Л. А.* Спеченное покрытие для деталей, работающих в условиях эрозионного износа / Л. А. Иванов, Г. П. Пархоменко // *Порошковая металлургия.* – 1974. – № 2. – С. 90–94.
13. *Тарельник В. Б.* Улучшение служебных характеристик поверхностных слоев на основе железа за счет применения композиционных электроэрозионных покрытий // *Электрон. обраб. материалов.* – 1995. – № 4. – С. 61–62.
14. *Тарельник В. Б.* Управление качеством поверхностных слоев комбинированным электроэрозионным легированием. – Сумы: МакДен, 2002. – 323 с.
15. *Гитлевич А. Е.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
16. *Лещинский В. М.* Применение композиционных электроэрозионных покрытий с последующим поверхностным пластическим деформированием / В. М. Лещинский, В. Б. Тарельник // *Химическое и нефтяное машиностроение.* – 1996. – № 3. – С. 71–72.

Сумский национальный аграрный университет, Сумы
 Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича
 НАН Украины, Киев
 Политехника Свентокржинская, Кельце, Республика Польша

Статья поступила
 21.02.2016