

СОСТАВ, СТРУКТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ*

А. В. ПАУСТОВСКИЙ, Ю. Г. ТКАЧЕНКО, Р. А. АЛФИНЦЕВА, Д. З. ЮРЧЕНКО, В. Г. ХРИСТОВ

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Кржижановского, 3.
E-mail: tkachenko_yuri@ukr.net

Разработаны электродные материалы для получения электроискровых покрытий из сплава колманой-WC, с содержанием WC 10...70 мас. % и твердых сплавов с использованием TiC, Mo₂C, TiN, Co, Cr, Ni, Al. Исследованы фазовый состав, структура, кинетика массопереноса, твердость и износостойкость электроискровых покрытий из разработанных сплавов. Показано, что в сплавах колманой, колманой-10 % WC и колманой-25 % WC наблюдается структура эвтектического характера. При энергии импульса 7,5 Дж толщина сформированных покрытий составила 3...5 мм. Износостойкость покрытий колманой-WC в 3,5 раза выше покрытий из сплава колманой. Установлено, что структура и состав разработанных электродных материалов из твердых сплавов на основе TiC позволяют получить электроискровые покрытия толщиной до 100 мкм, твердостью до 14 ГПа. Разработанные электродные материалы применены в промышленных условиях для упрочнения и восстановления электроискровым способом изношенных деталей из конструкционных сталей. Библиогр. 4, табл. 3, рис. 7.

Ключевые слова: электроискровое упрочнение, электродные материалы, восстановление деталей, эрозионные свойства, свойства покрытий, износостойкость, жаростойкость

Получение электроискровым способом толстых покрытий для восстановления изношенных поверхностей имеет ряд особенностей, требующих разработки электродных материалов, способных к эрозии преимущественно в жидкой фазе. Основной этих композиций должны быть металлы, продукты эрозии которых хорошо адгезируют к материалу основы. Реализация этих принципов при создании электродных материалов существенно повысит эффективность нанесения покрытий на металлические поверхности.

Эвтектические сплавы на основе никеля и железа, содержащие легирующие добавки бора, кремния, хрома, используются при получении плазменных и детонационных покрытий [1]. Применение таких сплавов для электроискрового легирования требует исследований структуры и свойств полученных покрытий, разработки технологии получения компактных электродов и разработки технологического процесса.

Для получения износостойких (толщиной 0,5...2 мм) электроискровых покрытий были исследованы материалы электродов из сплава с эвтектической структурой системы Ni-Ni₃B, легированного кремнием и медью, а также с добавками WC. Предыдущие исследования [2] показали це-

лесообразность работы в этом направлении. В данной работе выполнены исследования и разработаны технологии получения эвтектического сплава Ni-Ni₃B, входящего в класс колманой, разработаны технологии получения порошковых смесей системы WC-колманой с различным соотношением компонентов. Разработана технология и установлены оптимальные режимы прессования и последующего спекания порошковых смесей с целью получения электродов, в которых пористость не превышает 10 %.

С целью получения покрытий высокой твердости и толщиной 40...80 мкм наиболее эффективное направление современных исследований заключается в разработке электродных материалов, содержащих в основе тугоплавкие соединения с металлической связкой, оптимизации состава и структуры этой связки и технологии изготовления электродов. Целесообразным является проведение работы по созданию электродных материалов с использованием TiC, Mo₂C, TiN, Co, Cr, Ni, Al.

Сплавы системы колманой-WC. Электродные материалы колманой-WC были изготовлены методами порошковой металлургии: размол, смешивание, введение пластификатора, прессование и спекание. Для разработки электродного матери-

* По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).

ала был использован порошок сплава на основе никеля, принадлежащего к группе сплавов колманой, полученный методом распыления. Этот сплав находится в области тройной эвтектики с основной фазой твердого раствора на основе никеля, температура плавления которой около 860 °С, что обеспечивает при электроискровом легировании высокий массоперенос и толщину покрытия, достаточную для восстановления изношенных деталей. В качестве добавки была использована медь. Как раскислитель использовали кремний, наиболее эффективную легирующую добавку, которая значительно увеличивает жаростойкость. Твердость сплава зависела от количества вводимого карбида вольфрама.

Порошок карбида вольфрама размалывали в шаровой мельнице в среде спирта–ректификата при массовом соотношении «порошок : твердосплавные шары : спирт» – 2:6:1. Время размола — 72 ч. Размер частиц порошка основной фракции менее 1 мкм.

Смесь колманой-карбид вольфрама получали путем размола-смешивания в течение 4 ч при массовом соотношении «порошок : твердосплавные шарики : спирт» – 2:8:1. После размола смесь сушили в сушильном шкафу и смешивали с 5 %-ным раствором синтетического каучука в бензине. Полученные смеси сушили в вытяжном шкафу и протирали на сите 045. Были получены порошковые смеси колманой-(10, 20, 25, 30, 40, 50, 70) мас. % WC. Заготовки размером 4×4×70 мм прессовали на гидравлическом прессе под давлением 300 МПа. Пористость заготовок составляла 40...42 %. Прессовки сушили в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 12 ч.

Спекание электродов проводили в 2 этапа. Предварительное спекание в муфельной печи в среде водорода при температуре 800 °С в течение 2 ч. Скорость повышения температуры 0,06 град/с. Образцы размещались в засыпке из прокаленного глинозема с 2 %-ной добавкой графитовой крупки. Окончательное спекание производилось в вакуумной печи в вакууме $6,67 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре 960...980 °С в течение 2 ч. При такой температуре спекания образцы имеют пористость до 10 %, которая является оптимальной. При большей пористости, которая получается при меньшей температуре спекания, электрод в процессе нанесения покрытия нагревается до 800...1000 °С вследствие уменьшения его теплопроводности и происходит значительное окисление материала покрытия.

Микроструктура сплава колманой — структура доэвтектического сплава соответственно диаграммы фазовых равновесий Ni–Ni₃W. Первичная фаза — твердый раствор бора, меди и кремния на основе никеля с микротвердостью 2,3 ГПа, вторич-

ная фаза — эвтектика, состоящая из твердого раствора на основе никеля и боросилицидной фазы на основе никеля, с микротвердостью 7...8 ГПа. Рентгенофазовый анализ литого никеля и сплава колманой свидетельствует, что при легировании никеля кремнием и медью образуются твердые растворы замещения, а легирование бором приводит к образованию твердого раствора внедрения, в результате чего параметр решетки твердого раствора на основе никеля увеличивается от 0,3520 нм для никеля до 0,3588 нм для сплава колманой (атомные радиусы — $a_{Ni} = 0,124$, $a_{Si} = 0,134$, $a_{Cu} = 0,128$ нм [3]). Расчет параметров кристаллической решетки для WC показал, что в данном случае элементы бор и кремний растворяются в карбиде вольфрама, образуя твердые растворы замещения. Медь растворяется в никеле. Микроструктура сплавов, содержащих 25, 50, 60, 70, 80 % WC, представляет собой конгломерат мелкозернистых фаз твердого раствора на основе никеля и тугоплавких карбо-боросилицидных сочетаний. Полученные микроструктуры имеют типичные признаки структур твердых сплавов WC–Co (смесь иглообразных фаз карбида вольфрама и твердого раствора на основе металла).

Электроискровую обработку поверхности стали 45 разработанными сплавами колманой-WC выполняли на установке «ЭЛИТРОН-52» на нулевом режиме при напряжении 100 В, энергии импульса — $E_{имп} = 7,5$ Дж. Массоперенос с анода на катод измеряли путем взвешивания образцов на аналитических весах. Твердость покрытия измеряли на приборе ПМТ-3. Значение массопереноса для электродов с различным содержанием WC (от 10 до 70 мас. %) изменялось соответственно от 2,3 до 0,49 г/см² с максимум 2,7 при содержании 25 мас. % WC. Проведенные исследования зависимости твердости полученных покрытий от содержания WC в электродах показали значительное повышение твердости — от 3 до 8,7 ГПа. Для восстановления закаленных стальных деталей оптимальными оказались электроды, содержащие 50...60 % WC. При использовании сплава с 50 % WC твердость покрытия около 5 ГПа, однако его перенос на подложку на 25 % ниже, чем для сплава колманой. В случае использования сплава с 60 % WC твердость покрытия 7 ГПа. Его массоперенос в 1,5 раза ниже, чем в случае сплава колманой. Этого достаточно для получения покрытий толщиной до 2 мм. Сплав с 70 % WC дает возможность получать покрытия с твердостью 8,7 ГПа, но его перенос в 5 раз меньше, чем сплава колманой.

Проведенные исследования показали, что изменяя соотношение компонентов в сплаве колманой-WC, можно получать в соответствии с потребностями различные значения толщины покрытия, например на стали 45: из электродного

материала колманой — 4,2...4,8; колманой-25 % WC — 4,0...4,5; колманой-50 % WC — 3,2...3,8 мм, а также его твердости. Разработанные сплавы рекомендованы для восстановления изношенных деталей из конструкционных сталей.

Надо отметить, что поверхность покрытий, полученных на установке «ЭЛИТРОН-52» при мощной энергии импульса, является «бугристой» и требует дальнейшей механической обработки.

Исследование кинетики массопереноса сплавов колманой-WC на сталь 45 проводили также на установке ЭФИ-46А на режиме: частота колебаний 100 Гц, ток короткого замыкания $I_{кз} = 4$ А, рабочий ток $I_r = 1,5...2,0$ А, энергия одного разряда $E = 0,28$ Дж, (что в 27 раз меньше энергии на установке «ЭЛИТРОН-52») время обработки 10 мин/см². Определялась кинетика изменений следующих параметров: эрозии анода Δ_a , масса увеличения катода Δ_k (подложка – сталь 45), определенные за каждую минуту обработки 1 см² подложки.

На рис. 1 приведены зависимости прироста массы катода Δ_k , при электроэрозионной обработке поверхности стали 45 сплавами системы колманой-WC, колманой и стандартным сплавом ВК20.

Микротвердость покрытий, полученных на установке ЭФИ-46А, представлена на рис. 2. Сравнение значений микротвердости покрытия с 10 % WC с покрытием, содержащим 70 % WC, показало, что микротвердость последнего, в зависимости от расстояния до поверхности, в 5 раз превышает микротвердость покрытия колманой-10 % WC.

Исследования на трение и износ покрытий на стали 45 в условиях сухого трения скольжения на воздухе при комнатной температуре по схеме вал-плоскость проводили на машине трения при скорости скольжения 10 м/с и нагрузке 10 кг [4]. Покрытия на торцевой поверхности обрабатывали до чистоты $Ra = 0,2$ мкм. Определяли коэффициент трения f и интенсивность изнашивания I , мкм/км. Для сравнения были испытаны образцы стали 45 без покрытия. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Результаты проведенных исследований показали, что износостойкость покрытий увеличивается с увеличением содержания WC. Износостойкость покрытия при применении электрода с 70 % WC почти в 9 раз больше износостойкости стали.

Проведенные исследования свойств электроискровых покрытий (значения массопереноса, толщины, твердости и износостойкости) дали возможность определить оптимальное содержание легирующих элементов: меди — 4...5, бора — 0,5...0,7, кремния — 3,2 %, что обеспечивает образование тройной эвтектики Ni-Ni₃B-Si-Cu, невысокая температура плавления которой позволяет получать высокие значения массопереноса элект-

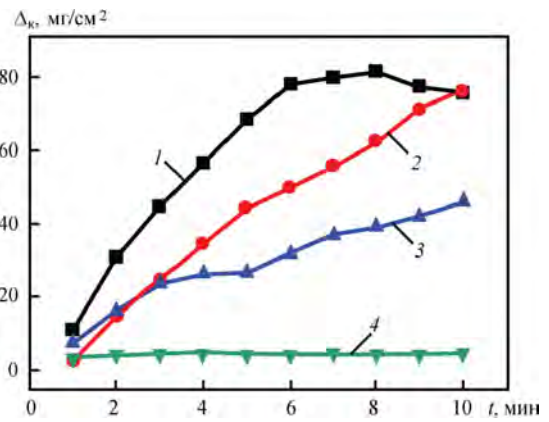


Рис. 1. Кинетические зависимости прироста массы катода Δ_k при электроэрозионной обработке стали 45 сплавами системы колманой-WC и сплавом ВК20: 1 — колманой-25 % WC; 2 — колманой; 3 — колманой-70 % WC; 4 — ВК20

родного материала на поверхность детали. Содержанием WC регулируется твердость покрытия.

Электродные материалы на основе карбида титана. Объектами исследования выбраны сплавы на основе карбидов титана с добавками тугоплавких соединений (Mo_2C , TiN), а также металлов Co, Cr, Al и Ni. При изготовлении образцов использовали порошки тугоплавких соединений Донецкого завода химреактивов, а также технические порошки никеля, кобальта и хрома.

Образцы сплавов изготавливали путем размол исходных компонентов в заданном соотношении в планетарной мельнице с последующим горячим прессованием. Размол порошковых смесей TiC-Mo₂C-Co-Cr, TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr и TiC-Co-Ni-C проводили в среде ацетона при соотношении «порошок : стальные шарики» = 1: 5 в течение 30 мин. Размер частиц основной фракции полученных смесей составлял менее 1 мкм. Горячее прессование образцов в графитовых прессформах проводили на гидравлическом прессе при температурах 1420...1500 °С, давлении 30 МПа и продолжительности спекания 5...20 мин. Относительная плотность горячепрессованных образцов составляла 0,96...0,98.

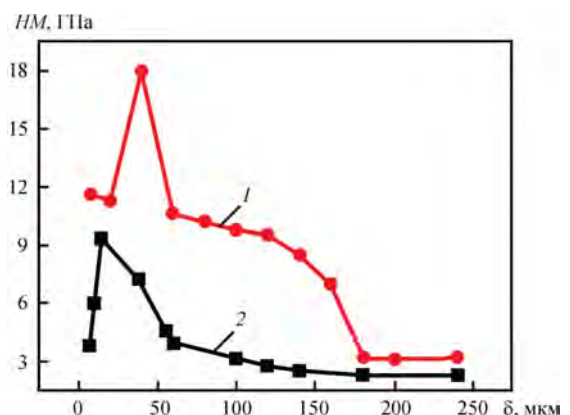


Рис. 2. Зависимость микротвердости покрытий от расстояния до поверхности: 1 — колманой-70 % WC; 2 — колманой-10 % WC

Таблица 1. Интенсивность изнашивания покрытий системы колманой–WC на стали 45 ($P = 10$ кг, $v = 10$ м/с)

Материал электрода	I , мкм/км	f
колманой	64,5	0,29
колманой + 10 % WC	60,8	0,28
колманой + 25 % WC	58,6	0,30
колманой + 38 % WC	37,5	0,37
колманой + 60 % WC	37,0	0,38
колманой + 70 % WC	18,5	0,30
Сталь 45	160	0,40

Разработанные карбидотитановые сплавы были использованы в качестве электродных материалов для нанесения защитных покрытий на стальную подложку из стали 45. Электроискровую обработку стальных поверхностей проводили на установке «ЭЛИТРОН-22А» при $I_p = 0,8; 1,3; 1,8$ и $2,3$ А. В процессе исследования определяли массу эродированного материала анода Δ_a , мг и прирост массы катода Δ_k , мг/см². Исследования фазового состава горячепрессованных образцов карбидотитановых сплавов и структуры защитных электроискровых покрытий из них на стальной подложке проводили на установке ДРОН-3М в CuK_α -излучении. Электронномикроскопические исследования субструктуры и изломов горячепрессованных образцов на основе карбида титана, а также сформированных электроискровых слоев на стальной подложке (по глубине) осуществляли на установке ПЕМУ SelMI. Плотность полученных образцов определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах марки АДВ-200, микротвердость HM — на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,0 Н.

Проведен рентгенофазовый анализ электродных материалов следующих составов (мас. %): $\text{TiC}-12\text{Co}-3\text{Ni}-0,5\text{C}$, $\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-12\text{Co}-5\text{Cr}$ и $\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-10\text{TiN}-12\text{Co}-5\text{Cr}$, а также покрытий, нанесенных на подложку из стали 45 с использованием указанных электродных сплавов (табл. 2 и 3).

Согласно данным рентгеновских исследований стальная подложка представляет собой α -Fe с очень незначительным количеством оксида железа Fe_2O_3 . Основной фазой электродного сплава $\text{TiC}-\text{Co}-\text{Ni}-\text{C}$ является карбид титана несте-

хиометрического состава в области гомогенности TiC_{1-x} . Кроме того, выявлено β -Co и присутствующие на дифрактограмме линии очень слабой интенсивности, которые идентифицированы как оксид титана $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$. В электроде $\text{TiC}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{Co}-\text{Cr}$ аналогично электроду $\text{TiC}-\text{Co}-\text{Ni}-\text{C}$ основной фазой является карбид титана нестехиометрического состава в области гомогенности TiC_{1-x} . Выявлен карбид хрома Cr_3C_2 . Также согласно дифрактограммы в электродном материале присутствуют следы $\text{Co}(\text{Ti})$, карбида молибдена Mo_2C , интерметаллида CoTi_2 и оксида титана $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$. В сплаве $\text{TiC}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{TiN}-\text{Co}-\text{Cr}$ основной фазой является карбонитрид титана TiCN . На дифрактограмме присутствуют также слабые линии, которые идентифицированы как интерметаллиды Cr_2Ti , Co_3Ti , а также очень слабые линии оксида титана $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$.

Разработанные сплавы имеют подобную структуру и отличаются только дисперсностью. В сплаве $\text{TiC}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{Co}-\text{Cr}$ размер зерен карбида титана достигает 10 мкм, а в сплаве $\text{TiC}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{TiN}-\text{Co}-\text{Cr}$ он не превышает 5 мкм. В этих сплавах по данным локального рентгеноспектрального анализа наблюдаются зернограничные прослойки, содержащие Co и Cr.

В сплаве $\text{TiC}-\text{Co}-\text{Ni}-\text{C}$ зерна карбида титана размером от 2 до 10 мкм разделены прослойкой зернограничной фазы толщиной до 1 мкм. Зернограничная фаза по данным локального рентгеноспектрального анализа содержит Co и Ni. В образце наблюдаются поры (в основном по границам зерен) до 10 мкм.

На рис. 3 показана кинетика прироста массы катода из стали 45 при электроискровом легировании электродами из карбидотитановых твердых сплавов, а также стандартного сплава ТН-20 ($\text{TiC}-15\% \text{Ni}-6\% \text{Mo}$).

Максимальный эффект при формировании защитного покрытия на стальной подложке наблюдается при использовании сплава на основе карбида титана, содержащего карбид молибдена, кобальт и хром. При этом масса перенесенного электродного сплава на стальную подложку более

Таблица 2. Фазовый состав и микротвердость электродных материалов

Состав сплавов, мас. %	HM , ГПа	Фазовый состав сплавов
$\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-10\text{Co}-5\text{Cr}$ (1)	27,0	TiC_{1-x} , Cr_3C_2 , Mo_2C , CoTi_2 , $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$
$\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-10\text{TiN}-12\text{Co}-5\text{Cr}$ (2)	25,6	TiCN , Cr_2Ti , Co_3Ti , $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$
$\text{TiC}-12\text{Co}-3\text{Ni}-0,5\text{C}$ (3)	24,5	TiC_{1-x} , β -Co, $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$

Таблица 3. Фазовый состав покрытий на стальной подложке из сплавов на основе карбида титана

Состав электродного материала, мас. %	Фазовый состав покрытия на подложке из стали 45
$\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-10\text{Co}-5\text{Cr}$ (1)	TiC_{1-x} , Cr_3C_2 , $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$, $\text{Co}(\text{Ti})$, Cr_2Ti
$\text{TiC}-5\text{Mo}_2\text{C}-10\text{TiN}-12\text{Co}-5\text{Cr}$ (2)	TiCN , $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$, $\text{Co}(\text{Ti})$, Co_3Ti , FeTi
$\text{TiC}-12\text{Co}-3\text{Ni}-0,5\text{C}$ (3)	TiC_{1-x} , $\text{Co}(\text{Ti})$, $\text{Ti}_x\text{O}_{2x-1}$, Fe_2O_3 , CoO , CoTi_2

чем в 3 раза выше по сравнению со стандартным твердым сплавом ТН-20.

Как свидетельствуют результаты рентгенофазового анализа сформированных покрытий (табл. 3), в покрытиях, полученных при электроискровом легировании с $I_p = 0,8$ и $1,3$ А и использованием электрода TiC-Co-Ni-C, основной фазой является карбид титана нестехиометрического состава в области гомогенности TiC_{1-x} с межплоскостным расстоянием, которое несколько меньше, чем такое же в электродном материале. В покрытии также присутствует твердый раствор титана в кобальте $Co(Ti)$, оксид титана Ti_xO_{2x-1} . Кроме того, в покрытии проявляются составляющие подложки Fe и оксид железа Fe_2O_3 , а также наблюдаются слабые линии, которые могут указывать на наличие в покрытии следов оксида кобальта CoO и интерметаллида $CoTi_2$.

Проведенные электронномикроскопические исследования морфологии поверхности электроискровых покрытий из сплавов на основе TiC показали, что для всех трех покрытий характерно наличие на поверхности двух видов морфологий: первая — поверхность оплавлена, вторая представлена накоплением округлых частиц размерами от долей микрона до 10 мкм. В покрытиях, сформированных из первых двух сплавов, наблюдаются накопления мелких округлых частиц, в случае использования сплава № 3 округлые частицы достаточно равномерно распределены по поверхности. На относительно гладких оплавленных участках наблюдаются трещины. Исследование состава методом локального рентгеноспектрального анализа не показало отличий в составе оплавленных участков и участков, покрытых накоплениями частиц. Анализ поперечных сечений электроискровых покрытий из сплавов на основе карбида титана на подложке из стали 45 показал, что толщина сформированных покрытий составляет 50...100 мкм.

На этих же образцах было изучено распределение микротвердости по глубине покрытий (рис. 4). Из приведенных данных видно некоторую аномалию в изменении микротвердости по глубине покрытия, а именно — на расстоянии от поверхности покрытия 10...15 мкм микротвердость составляет 7...9 ГПа с последующим ее повышением, по мере удаления от поверхности, до значений 12...14 ГПа. Объяснение этому следует искать в изменении содержания элементов по толщине покрытий, например кислорода в приповерхностном слое. Так, чем меньше содержание кислорода, тем меньше наличие твердых фаз, содержащих кислород (табл. 3) в процессе формирования электроискровых покрытий.

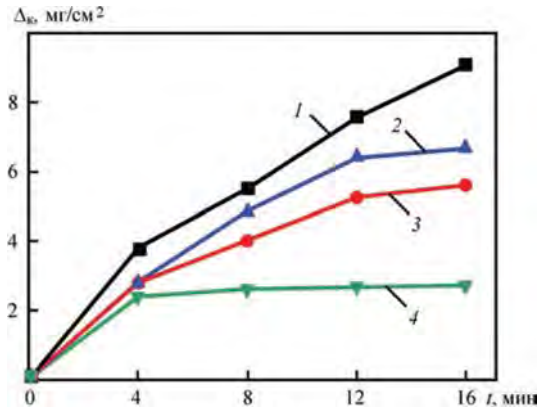


Рис. 3. Кинетика прироста массы катода из стали 45 при электроискровом легировании сплавами на основе карбида титана: TiC-Mo₂C-Co-Cr (1), TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr (2), TiC-Co-Ni-C (3) и ТН-20 (4)

Покрытия из твердых сплавов на основе карбида титана были испытаны в условиях трения об абразивную шкурку из карбида кремния зернистостью Р1200. Интенсивность изнашивания при абразивном трении покрытия из сплава TiC-Mo₂C-Co-Cr на пути трения до 15 м в 2 раза меньше в сравнении со сталью 45.

Износостойкость, определенная при трении по абразивной шкурке, является фундаментальной характеристикой прочностных свойств поверхностного слоя образца. Относительная износостойкость дает в безразмерных единицах количественную оценку сопротивления материала разрушению. Полученные данные в сочетании с данными о твердости покрытий в сечении подтверждают эффективность электроискрового упрочнения стальных поверхностей разработанными материалами.

Проведена оценка триботехнических свойств образцов из стали 45 с электроискровыми покрытиями, нанесенными на установке «ЭЛИТРОН-22А» при рабочем токе 1,3 А с использованием электродов из разработанных сплавов

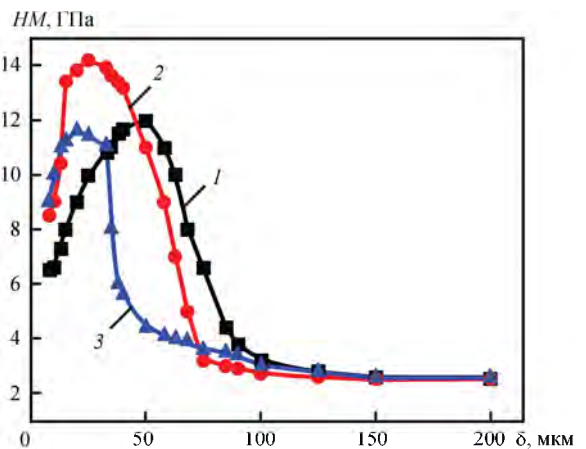


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных при легировании подложки из стали 45 карбидотитановыми твердыми сплавами: TiC-Mo₂C-Co-Cr (1), TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr (2), TiC-Co-Ni-C (3)

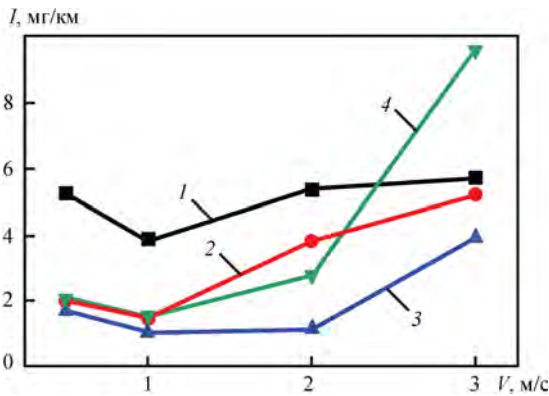


Рис. 5. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания электроискровых покрытий из сплавов: TiC-Mo₂C-Co-Cr (1), TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr (2), TiC-Co-Ni-C (3) и TiN-20 (4) при трении по стали 45

на основе карбида титана и стандартного сплава TiN-20. Испытания на трение и износ проведены по схеме вал-плоскость на машине трения [4] при скоростях скольжения 0,5, 1,2 и 3 м/с и нагрузке 1 МПа. В качестве контртела использовали кольцо (вал) диаметром 40 мм из закаленной стали 45 (HRA 42...48) с шероховатостью рабочей поверхности $Ra = 0,2$ мкм. Испытания проводили на воздухе без смазки. Путь трения составлял 3 км. Температуру в зоне контакта измеряли на расстоянии 0,3 мм от поверхности трения. Интенсивность изнашивания I (мг/км) определяли путем взвешивания образца с покрытием до и после испытаний.

На рис. 5 показана зависимость интенсивности изнашивания электроискровых покрытий из разработанных электродных материалов на стальной подложке при различных скоростях скольжения. Температура в зоне контакта изменялась в зависимости от скорости скольжения в диапазоне 92...275 °С. Рост температуры в зоне контакта по мере повышения скорости скольжения приводит у всех пар трения к росту интенсивности изнашивания и снижению коэффициента трения. Исследования показали, что полученные покрытия при скоростях скольжения до 2 м/с при трении по стали имеют высокую износостойкость и могут быть использованы в парах трения.

Практическое использование разработанных электродных материалов. Применение новых композиционных электродных материалов колманой-WC дает возможность получать электроискровые покрытия толщиной до 2...4 мм с износостойкостью в 5...10 раз выше износостойкости стали 45. Изменяя соотношение компонентов колманой и WC возможно получать покрытия на конструкционных сталях с широким спектром свойств. Для восстановления деталей из стали Ст.3 или не закаленной стали 45 целесообразным является использование покрытий из сплава, содержащего не более 25 мас. % WC. Для восстановления деталей из закаленных ста-



Рис. 6. Шахтные гидростойки после восстановления методом электроискрового легирования

лей необходимо использовать покрытия из сплава с содержанием 50 мас. % WC. Проведена работа по практическому использованию материалов и технологии электроискрового упрочнения и восстановления металлических поверхностей на предприятиях «ТЕХМАШКОМПАНИ» и «Укрметаллургремонт» (г. Днепропетровск).

Одна из причин выхода из строя деталей машин — фреттинг-коррозия, которая возникает на границе раздела двух тел, контактирующих друг с другом. Сочетание природной коррозии с фреттинг-механическим износом двух поверхностей, имеющих малое относительное взаимное перемещение, приводит к значительному повышению степени износа поверхностей и опасности локального разрушения. Износ имеет вид так называемых язв (каверн), достигающих значительной глубины. К таким парам относятся контактирующие поверхности подшипников, шлицы, шпоночные соединения, прессовые посадки, детали электродвигателей, кулачковые механизмы, соприкасающиеся валы. Эти язвы приводят к образованию усталостных трещин и локальному разрушению. Убрать эти язвы, особенно на деталях, где не допускается термическое воздействие на металл, практически невозможно. Только электроэрозионная обработка позволяет исправить этот дефект. Но в этом случае глубина язв не может превышать 0,4 мм. Разработанный авторами сплав колманой-WC позволяет увеличить точечную толщину нанесенного слоя до 1,8 мм, что позволяет значительно расширить номенклатуру ремонтно-пригодных деталей.

Сплав колманой-WC успешно был использован на предприятии «ТЕХМАШКОМПАНИ» для восстановления штоков шахтных гидростоек (рис. 6), которые эксплуатируются во влажной среде, и при длительной эксплуатации на поверхности штока в местах контакта с нижней и верхней опорой стойки образуются точечные каверны, приводящие к потере герметичности узла и резкому снижению нагрузки, воспринимаемой стойкой. Это приводит к необходимости ремонта стоек. Электроэрозион-



Рис. 7. Восстановление посадочных мест промышленных вентиляторов

ное устранение каверн с последующим выглаживанием вместо применяемой в настоящее время наплавки всей поверхности штока с последующей механической обработкой, позволило значительно снизить время восстановления штока и в 3 раза уменьшить расходы на ремонт.

Промышленные испытания сплава колманой-WC показали, что по ряду показателей он превосходит сплавы типа ВК и стеллит, которые применяются при электроискровом восстановлении в настоящее время. Максимальная толщина наносимого слоя увеличилась с 0,5 до 1,8 мм.

В промышленных условиях была внедрена технология электроискрового нанесения покрытий для восстановления посадочных поверхностей осей крановых тележек мостовых кранов, посадочных отверстий в корпусе буксы оси крановой тележки, посадочных отверстий подшипников в крышках электродвигателей и для упрочнения инструментов. Ось крановой тележки имеет диаметр 100 и длину 700 мм. Она изготовлена из стали 45. В процессе эксплуатации изнашивается посадочная поверхность на концах осей шириной 40 мм. Величина износа достигает 0,4 мм. Восстановление производится окончательно без последующей механической обработки. Оператор определяет необходимую толщину покрытия восстановления и, выбрав один из 9 режимов установки ЭИЛ8а, наносит на поверхность детали необходимый слой. Восстановление посадочных отверстий подшипников в крышках электромоторов производится по той же технологии.

Электроискровое легирование было использовано для восстановления валов электродвигателей. Раньше эти валы заменялись новыми. Восстановление валов методом электродуговой наплавки на изношенные посадочные места подшипников металлических сплавов показало, что вследствие высокой температуры наплавки в ста-

ли вала происходят структурные изменения, а соответственно и деформация, которую механической обработкой исправить невозможно. В электродвигателе появлялось биение и он становился непригодным для эксплуатации. Вопрос был решен методом электроискрового легирования. Электродный материал колманой-50 % WC был использован на НПП «Электромаш» (г. Сумы) для локального упрочнения на установках «Элитрон-22А» и «Электрон-52А» лемехов плугов, восстановления валков прокатных станков и посадочных мест промышленных вентиляторов (рис. 7).

Выводы

1. Разработана технология получения эвтектического сплава Ni-Ni₃B (колманой) с добавками WC. Установлено наличие эвтектических структур в разработанных электродах. Показано, что твердость возрастает с ростом содержания WC от 2,8 до 8,7 ГПа для сплава колманой и колманой-70 % WC соответственно. Толщина покрытий уменьшается от максимальной 4,2...4,8 мм для сплава колманой до 3,2...3,8 для сплава с 50 % WC. Микроструктура полученных покрытий имеет характер тонкого конгломерата фаз на основе никеля и WC. Износостойкость покрытий колманой-WC в 3...5 раз выше износостойкости стали 45.

2. Покрытия на металлических подложках электродами на основе TiC имеют толщину 50...100 мкм, сплошность около 80 %, микротвердость 12...14 ГПа. При трении скольжения износостойкость покрытий из разработанных сплавов на основе TiC в 2...4 раза выше по сравнению с покрытиями из стандартного сплава ТН-20.

3. Внедрение технологии электроискровой обработки изношенных поверхностей и новых электродных материалов в 1,5...2 раза увеличивают стойкость деталей и инструментов и в 3...5 раз уменьшают затраты, связанные с ремонтом оборудования.

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: [Справочник] / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
2. 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.] // Электронная обработка материалов. – 2013. – 49, № 1. – С. 4–13.
3. Уманский Я. С. Рентгенография / Я. С. Уманский, А. К. Трапезников, А. И. Китайгородский. – М.: Машгиз, 1951. – 310 с.
4. Колесниченко Л. Ф. Методика изучения трения и износа металлокерамических материалов / Л. Ф. Колесниченко, В. В. Полотай, Л. В. Заболотный // Порошковая металлургия. – 1970. – № 3. – С. 61–66.

Поступила в редакцию 25.12.2015