

Материалы для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных металлических поверхностей

А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко, В. Г. Христов, Р. А. Алфинцева, Д. З. Юрченко

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

Разработаны технологии получения электродных материалов из сплавов «колмоной-WC» и твердых сплавов с использованием TiC, WC, Mo₂C, TiN, Co, Cr, Ni, Al. Исследованы их фазовый состав и структура, кинетика массопереноса, твердость и износостойкость электроискровых покрытий из разработанных сплавов. Методы исследования – металлография и электронная микроскопия, рентгенофазовый и дюротметрический анализы. Показано, что в сплавах «колмоной» (Ni-Ni₃B-Si-Cu), «колмоной-10% WC» и «колмоной-25% WC» наблюдается структура эвтектического характера. При увеличении содержания WC в сплавах имеет место структура, представляющая конгломерат фаз твердого раствора на основе никеля и карбоборосилицида вольфрама. При энергии импульса 7,5 Дж толщина сформированных покрытий составляла 3–4 мм. Износостойкость покрытий увеличивается с увеличением содержания WC в покрытиях от 64,5 мкм/км для «колмоной» до 18,5 мкм/км для сплава с 70% WC, а износостойкость стали в этих условиях – 160 мкм/км. Установлено, что структура и состав разработанных электродных материалов из твердых сплавов на основе карбидов TiC и WC позволяют получить электроискровые покрытия толщиной до 100 мкм, твердостью до 20–24 ГПа. Масса перенесенного на подложку материала существенно больше, чем при использовании стандартных сплавов T15K6 и ТН–20. Разработанные материалы рекомендованы для упрочнения и восстановления изношенных деталей из конструкционных сталей электроискровым методом.

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

УДК 621.9.048.669.268

ВВЕДЕНИЕ

Получение электроискровым методом толстых покрытий для восстановления изношенных поверхностей имеет ряд особенностей, требующих разработки электродных материалов, способных эродировать преимущественно в жидкой фазе. Основой этих композиций должны стать металлы, продукты эрозии которых хорошо адгезируют к материалу основы. Эвтектические сплавы на основе никеля и железа, содержащие легирующие примеси бора, кремния, хрома, используются при получении газотермических покрытий (плазменных, детонационных) [1]. Применение таких сплавов для электроискрового легирования требует исследований структуры и свойств указанных покрытий, разработки технологий получения компактных электродов и электроискрового легирования.

Для получения износостойких (толщиной 0,5–2 мм) покрытий были исследованы материалы для электродов из сплава с эвтектической структурой системы Ni-Ni₃B, легированной кремнием и медью с добавками WC. Предыдущие исследования [2] показали целесообразность работы в этом направлении. В данной статье выполнены исследования и разработаны технологии получения эвтектического сплава Ni-Ni₃B,

входящего в класс «колмоной» в порошкообразном виде, а также порошковых смесей систем «колмоной-WC» с различным соотношением компонентов. Разработаны также технологии и установлены оптимальные режимы прессования и последующего спекания порошковых смесей с целью получения электродов, в которых пористость не превышала 10%.

Для получения покрытий высокой твердости с толщиной 40–100 мкм наиболее эффективное направление современных исследований – разработка электродных материалов, содержащих в основе тугоплавкие соединения с металлической связкой. Совершенствование таких материалов возможно за счет оптимизации состава и структуры металлической связки и технологии изготовления электродов. Учитывая предыдущий опыт [3, 4], целесообразно проведение работы по созданию электродных материалов с использованием тугоплавких соединений TiC, WC, Mo₂C, TiN, а в качестве металлической связки – Co, Cr, Ni, Al.

СПЛАВЫ СИСТЕМЫ «КОЛМОНОЙ-WC»

Электродные материалы «колмоной-WC» были изготовлены методом порошковой металлургии (размол, смешивание, введение пласти-

фикатора, прессование и спекание). Для разработки электродного материала был использован сплав, полученный методом распыления на основе никеля, который относится к группе сплавов «колмоной». Этот сплав находится в области тройной эвтектики с основной фазой твердого раствора на основе никеля, температура плавления которого $\sim 860^\circ\text{C}$, что обеспечивает при электроискровом легировании высокий массоперенос и толщину покрытия, достаточную для восстановления изношенных деталей. В качестве добавки использовали медь. Как раскислитель применили кремний – наиболее эффективную легирующую добавку, которая значительно увеличивает жаростойкость сплава. Твердость сплава варьировали количеством введенного карбида вольфрама. Порошок карбида вольфрама размалывали в шаровой мельнице в среде спирта-ректификата при массовом соотношении «порошок : твердосплавные шары : спирт» = 2:6:1. Время размолы – 72 часа. Размер частиц основной фракции размолотого порошка составляет до 1 мкм. Смесь «колмоной – карбид вольфрама» получали путем размолы-смешивания в течение 4 часов при массовом соотношении «порошок : твердосплавные шары : спирт» = 2:8:1. После размолы смесь сушили в сушильном шкафу и смешивали с 5% раствором синтетического каучука в бензине (0,4–0,5 кг на 1 кг шихты). Полученные смеси сушили в вытяжном шкафу и протирали через сито 045. Были получены электроды «колмоной» – (10, 20, 25, 30, 40, 50, 70) масс.% 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°C в течение 12 часов. Спекание проводили в 2 этапа. Предварительное спекание проходило в муфельной печи в среде водорода при температуре 800°C в течение 2 часов. Скорость повышения температуры – 0,06 град/с. Образцы размещали в графитовой лодочке в засыпке из прожаренного глинозема с добавкой 2% графитовой крупки. Окончательное спекание проходило в вакуумной печи при вакууме $6,67 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре $960\text{--}980^\circ\text{C}$ в течение 2 часов. Спеченные образцы имели пористость до 10%, которая является оптимальной. При большей пористости, получаемой при меньшей температуре спекания, электрод в процессе нанесения покрытия нагревается до $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ вследствие уменьшения его теплопроводности, что приводит к значительному окислению материала покрытия.

Микроструктура сплава «колмоной» приведена на рис. 1а, на котором показана структура доэвтектического сплава согласно диаграмме

фазовых равновесий Ni-Ni₃B. Первичная фаза – твердый раствор бора, меди и кремния в никеле с микротвердостью 2,33 ГПа, вторичная фаза – эвтектика, состоящая из твердого раствора на основе никеля и боросилицидной фазы и никеля с микротвердостью 7–8 ГПа. Рентгенофазовый анализ литого никеля и сплава «колмоной» 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 для никеля до 0,3588 нм для сплава «колмоной» (атомные радиусы – $a_{\text{Ni}} = 0,124$ нм, $a_{\text{Si}} = 0,134$ нм, $a_{\text{Cu}} = 0,128$ нм [5]). Расчет параметров кристаллической решетки для WC показал, что в данном случае бор и кремний растворяются в карбиде вольфрама, образуя твердые растворы замещения. Медь растворяется в никеле.

Микроструктура электродного материала «колмоной + 10%WC» (рис. 1б) состоит из участков твердого раствора на основе никеля с микротвердостью 3 ГПа. Микротвердость эвтектической составляющей сплава достигает 9 ГПа. Микроструктура сплавов, содержащих 25–70%WC, представляет собой конгломерат мелкозернистых фаз твердого раствора на основе никеля и тугоплавких карбоборосилицидных соединений. Полученные микроструктуры этих сплавов имеют типичные признаки структур твердых сплавов WC-Co (смесь иглообразных фаз на основе карбида вольфрама и твердого раствора на основе металла).

Электроискровую обработку поверхности стали 45 разработанными сплавами «колмоной-WC» выполняли на установке «ЭЛИТРОН-52» на нулевом режиме при напряжении 100 В, энергии импульса $E_{\text{имп.}} = 7,5$ Дж. Массоперенос измеряли взвешиванием образцов на аналитических весах до и после электроискрового легирования поверхности катода. Микровердость покрытия определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,0 Н.

Значения массопереноса для электродов с различным содержанием WC (от 10 до 70 масс.%) изменялись соответственно от 2,3 до $0,49 \text{ г/см}^2$ с максимумом $2,7 \text{ г/см}^2$ при содержании 25% WC. Твердость полученных покрытий при увеличении содержания WC в электродах возрастает от 3 до 8,7 ГПа.

Проведенные исследования показали, что, изменяя соотношение компонентов в сплаве «колмоной-WC», возможно получать разные значения толщины покрытия (табл. 1) и его твердости в соответствии с потребностями. Разработанные сплавы рекомендованы для восстановления изношенных деталей из конструкционных сталей.

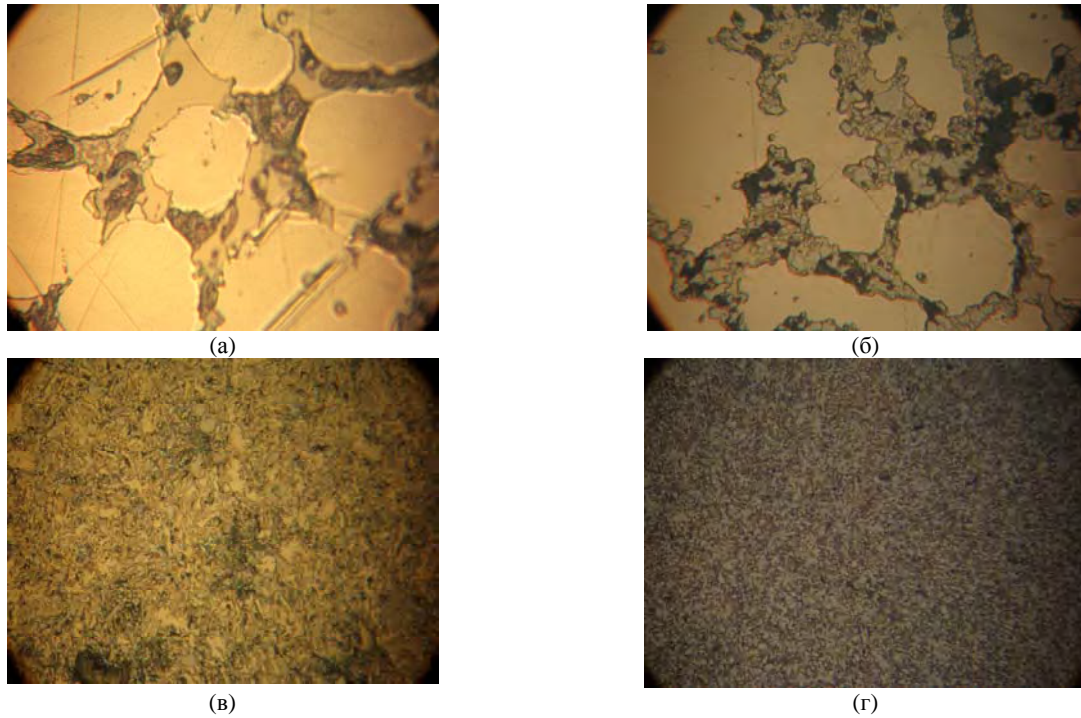


Рис. 1. Микроструктура электродных сплавов системы «колмоной – WC» (x400): (а) – колмоной 225; (б) – колмоной – 10% WC; (в) – колмоной – 50% WC; (г) – колмоной – 70% WC.

Таблица 1. Значения толщины электроискровых покрытий на стали 45, полученных из электродных материалов «колмоной-WC»

Электродный материал	Толщина покрытия, мм
колмоной	4,2–4,8
колмоной – 25% WC	4,0–4,5
колмоной – 50% WC	3,2–3,8

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

Исследование кинетики массопереноса сплавов «колмоной-WC» на сталь 45 проводили также на установке ЭФИ-46А на III режиме: частота колебаний 100 Гц, ток короткого замыкания $I_{к.з.} = 4$ А, рабочий ток $I_p = 1,5$ А, энергия одного разряда $E = 0,28$ Дж (что в 27 раз меньше энергии на установке «ЭЛИТРОН-52»), время обработки 10 мин/см². Кинетика электроэрозионной обработки стальной поверхности в этом случае определялась эрозией анода Δ_a , массопереносом с анода на катод Δ_k за каждую минуту обработки 1 см² подложки.

На рис. 2 приведены зависимости прироста массы катода Δ_k , эрозии анода Δ_a при электроэрозионной обработке стали 45 сплавами системы «колмоной-WC» и стандартного сплава BK-20.

Вид поперечных сечений электроискровых покрытий на стали 45 из сплавов, содержащих 10 и 40% WC, приведен на рис. 3.

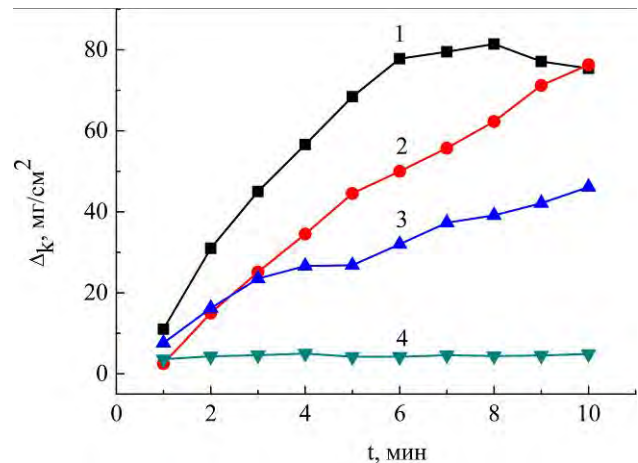


Рис. 2. Кинетические зависимости прироста массы катода Δ_k при электроэрозионной обработке стали 45 сплавами системы «колмоной-WC» и сплавом BK-20: 1 – колмоной-25% WC; 2 – колмоной; 3 – колмоной-70% WC; 4 – BK-20.

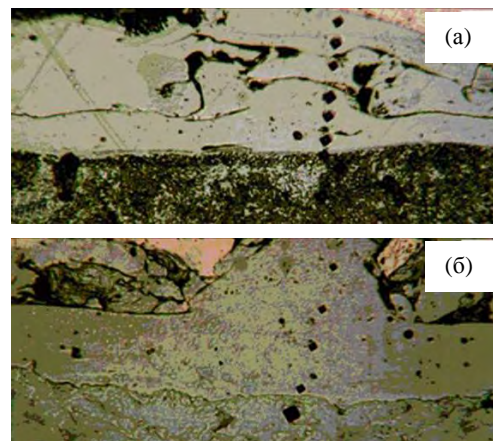


Рис. 3. Вид поперечных сечений электроискровых покрытий на стали 45(x400): (а) – колмоной-10% WC; (б) – колмоной-40% WC.

Измерение твердости полученных покрытий показало, что твердость с ростом содержания WC в сплавах повышается, особенно при содержании WC более 40%. Для восстановления закаливаемых стальных деталей оптимальными оказались электроды, содержащие 50–60% WC. Сплав с 50% WC позволяет получить покрытие с твердостью около 5 ГПа. Однако массоперенос его на 25% ниже, чем в случае использования сплава без WC («колмоной»). Использование электродного материала с 60% WC дает покрытия твердостью 7 ГПа. Его нанесение в 1,5 раза меньше сплава «колмоной». Этого достаточно для получения покрытий толщиной до 2 мм. Сплав с 70% WC имеет твердость 8,7 ГПа, но его перенос в 5 раз меньше, чем сплава «колмоной».

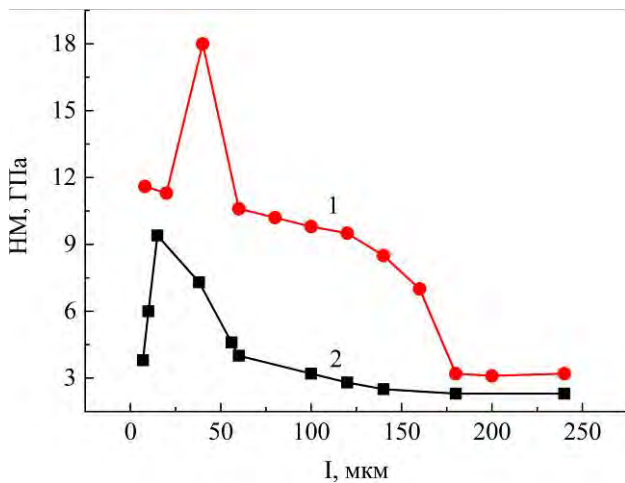


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных при электроэрозионном легировании стали 45 сплавами колмоной с 70 (1) и 10 (2) % WC.

Микротвердость покрытий, полученных на установке ЭФИ-46А, представлена на рис. 4. 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 «колмоной-10% WC» и находится в пределах 10–18 ГПа.

Испытания на трение и износ электроискровых покрытий на стали 45 проведено в условиях сухого трения скольжения на воздухе при комнатной температуре по схеме вал-плоскость на машине трения МТ-68, при скорости скольжения 10 м/с и нагрузке 10 кг [6, 7]. В качестве контртела использовали кольцо (вал) диаметром 40 мм из закаленной стали 45 (HRA 42–48) с шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 0,2$ мкм. Исследовали коэффициент трения f и интенсивность изнашивания I , мкм/км. Для сравнения была испытана сталь 45 без покрытия. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Опыты показали, что износостойкость покрытий увеличивается с увеличением содержания WC в электродном материале. Максимальная износостойкость наблюдается для покрытия из сплава с 70% WC, что в сравнении с износостойкостью стали почти в 9 раз больше.

Таблица 2. Характеристики трения электроискровых покрытий «колмоной-WC» на стали 45 ($P = 100$ Н, $V = 10$ м/с)

Электродный материал	Интенсивность изнашивания I , мкм/км	Коэффициент трения f
колмоной	64,5	0,29
колмоной-10% WC	60,8	0,28
колмоной-25% WC	58,6	0,30
колмоной-40% WC	37,5	0,37
колмоной-60% WC	37,0	0,38
колмоной-70% WC	18,5	0,30
Сталь 45	160	0,40

Проведенные исследования свойств электроискровых покрытий (значения массопереноса, толщины, твердости и износостойкости) и их анализ определили 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 электродного материала на поверхность детали и свойства сформированных покрытий.

ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ТИТАНА И ВОЛЬФРАМА

Объектами исследования выбраны сплавы на основе карбидов титана и вольфрама 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, хрома и алюминия.

Образцы сплавов на основе карбидов вольфрама и титана изготавливали методом размол исходных компонентов в заданном соотношении в планетарной мельнице с последующим горячим прессованием. Размол порошковых смесей TiC- Mo_2C -Co-Cr (1), TiC- Mo_2C -TiN-Co-Cr (2), WC-TiC- Mo_2C -Co-Cr (3) и WC-TiC-Co-Cr-Ni-Al (4) проводили в среде ацетона при соотношении «порошок : стальные шары» = 1:5 в течение 30 мин.

Размер частиц основной фракции полученных смесей составлял менее 1 мкм. Горячее прессование образцов диаметром 16 мм и высотой 4–5 мм в графитовых пресс-формах проводили на гидравлическом прессе при температурах 1420–1500°C, давлении 30 МПа и продолжительности спекания 5–30 мин. Относительная плотность горячепрессованных образцов составляла 0,96–0,98.

Разработанные сплавы использовали в качестве электродных материалов для нанесения электроискровых покрытий на стальную подложку из стали 45. Электроэрозионную обработку стальных поверхностей проводили на установке «ЭЛИТРОН-22А» при $I_p = 0,8; 1,3; 1,8$ и $2,3$ А. Удельное время легирования составляло 2–16 мин/см². В процессе исследования определяли прирост массы катода Δ_k , мг/см².

Исследования фазового состава горячепрессованных образцов сплавов и структуры защитных электроискровых покрытий из них на стальной подложке проводили на установке ДРОН-3М в CuK_α -излучении. Электронно-микроскопические исследования субструктуры и изломов горячепрессованных образцов электродных сплавов, а также сформированных электроискровых покрытий на стальной подложке (по глубине) осуществляли на установке ПЕМУ SelMI. Плотность полученных образцов определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах марки АДВ-200, микротвердость НМ – на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,0 Н.

Таблица 3. Состав, температура горячего прессования, плотность и микротвердость электродных материалов на основе карбидов вольфрама и титана

№ п/п	Состав электродного материала, мас.%	T°C гор. прес.	ρ , г/см ³	НМ, ГПа
1	TiC–5Mo ₂ C–10Co–5Cr	1500	5,2	27,0
2	TiC–5Mo ₂ C–10TiN–12Co–5Cr	1450	5,3	25,6
3	WC–10TiC–10Mo ₂ C–15Co–5Cr	1450	9,4	26,0
4	WC–13TiC–5Co–8Ni–5Cr–2Al	1500	10,0	22,5

Проведены рентгенофазовый и рентгеноспектральный анализы электродных материалов, а также электроискровых покрытий, нанесенных на подложку из стали 45, с использованием указанных электродных сплавов (табл. 3). Оптимальное количество металлической связки в сплавах (15–17 мас.%) установлено в результате проведения предварительных экспериментов при изучении эрозионных свойств твердых сплавов.

Результаты рентгенофазового анализа состава разработанных электродных материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Фазовый состав электродных материалов на основе карбидов вольфрама и титана

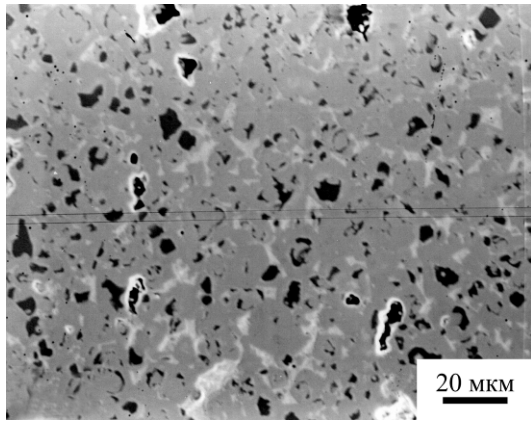
№ п/п	Состав сплава, мас.%	Фазовый состав электродных сплавов
1	TiC–5Mo ₂ C–10Co–5Cr	TiC _{1-x} , Cr ₃ C ₂ , Mo ₂ C, CoTi ₂ , Ti _x O _{2x-1}
2	TiC–5Mo ₂ C–10TiN–12Co–5Cr	TiCN, Cr ₂ Ti, Co ₃ Ti, Ti _x O _{2x-1}
3	WC–10TiC–10Mo ₂ C–15Co–5Cr	(W, Ti)C _{1-x} , Co ₃ W ₃ C, W ₂ CO, Mo ₂ C
4	WC–13TiC–5Co–8Ni–5Cr–2Al	(W, Ti)C _{1-x} , Co ₃ W ₃ C, W ₂ CO, NiTiO, TiO ₂

В электроде TiC–Mo₂C–Co–Cr основной фазой является карбид титана нестехиометрического состава в области гомогенности TiC_{1-x}. В меньшей степени присутствует карбид хрома Cr₃C₂. В соответствии с дифрактограммой в электродном материале обнаружены следы твердого раствора титана в кобальте Co(Ti), карбида молибдена Mo₂C, интерметаллида CoTi₂ и оксида титана Ti_xO_{2x-1}.

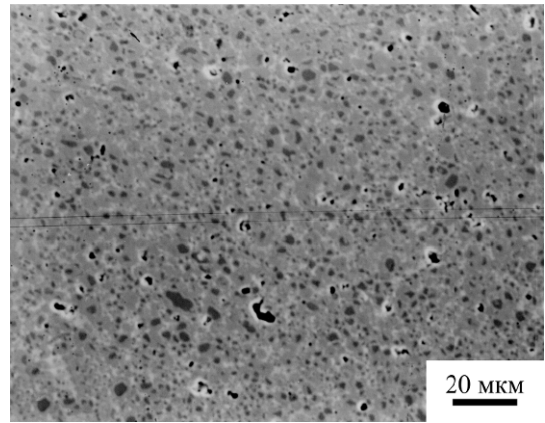
В сплаве TiC–Mo₂C–TiN–Co–Cr основной фазой является карбонитрид титана TiCN. На дифрактограмме присутствуют также слабые линии, которые идентифицированы как интерметаллиды Cr₂Ti, Co₃Ti, а также очень слабые линии оксида титана Ti_xO_{2x-1}. Основными фазами в электродных материалах на основе WC и TiC являются фазы (W, Ti)C_{1-x}, Co₃W₃C и оксикарбид вольфрама. В сплаве со связкой Co–Cr присутствует в небольшом количестве карбид молибдена, а со связкой Co–Ni–Cr–Al–оксиды – NiTiO, TiO₂.

Рентгенофазовый анализ показал, что стальная подложка представляет собой α -Fe с незначительным количеством оксида железа Fe₂O₃. При одинаковом содержании многокомпонентной металлической связки добавки хрома и карбида молибдена способствуют повышению твердости сплавов.

Результаты исследования микроструктуры карбидтитановых сплавов на сканирующем электронном микроскопе представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, рассматриваемые сплавы имеют сходную структуру и различаются только дисперсностью структурных составляющих. Если в сплаве TiC–Mo₂C–Co–Cr размер зерен карбида титана достигает 10 мкм, то в сплаве TiC–Mo₂C–TiN–Co–Cr он не превышает 5 мкм. В этих сплавах, по данным локального рентгеноспектрального анализа, наблюдаются зернограничные прослойки, содержащие Co и Cr. Электронно-микроскопические исследования электродных материалов на основе WC–TiC с Co–Cr и Co–Ni–Cr–Al–связкой свидетельствуют о доста-



(a)



(б)

Рис. 5. Структура сплавов TiC-Mo₂C-Co-Cr (а), TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr (б).

точно дисперсной структуре разработанных материалов, средний размер зерен которых составляет около 1 мкм.

В процессе электроискрового легирования стальной подложки исследован процесс массопереноса электродных материалов на стальную подложку.

На рис. 6 показана кинетика прироста массы катода из стали 45 при электроискровом легировании разработанными электродными сплавами. На этом же рисунке для сравнения показана кинетическая зависимость прироста массы катода из стали 45 при использовании в качестве электродного материала стандартных сплавов ТН-20 и Т15К6.

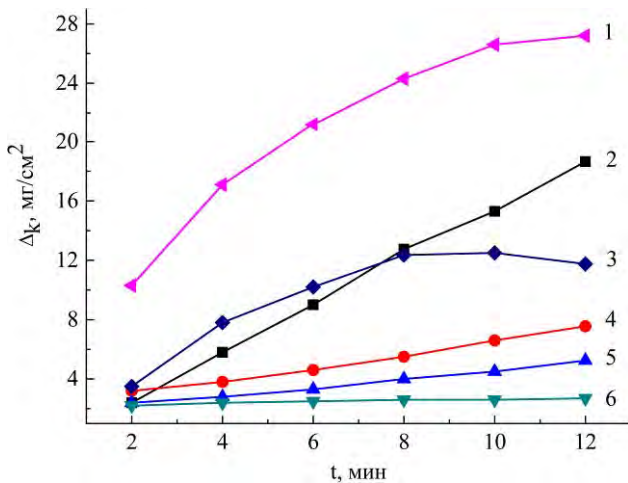


Рис. 6. Кинетические зависимости массопереноса (Δ_k) электродных материалов с анода на катод (сталь 45): 1 – WC-13TiC-20(Co-Ni-Cr-Al); 2 – WC-15TiC-6Co (Т15К6); 3 – WC-10TiC-10Mo₂C-20 (Co-Cr); 4 – TiC-5Mo₂C-10Co-5Cr; 5 – TiC-5Mo₂C-10TiN-12Co-5Cr; 6 – TiC-15% Ni-6%Mo (ТН-20).

Из приведенных выше данных видно, что при использовании безвольфрамовых электродных материалов максимальный эффект формирования защитного покрытия на стальной подложке наблюдается в случае применения сплава на основе карбида титана, содержащего карбид молибдена, кобальт и хром. При этом масса перене-

сенного сплава на стальную подложку более чем в 3 раза больше, чем при использовании стандартного твердого сплава ТН-20. Максимальный массоперенос электродного материала на основе WC-TiC на легированную поверхность стали 45 (28 мг/см²) наблюдается при использовании металлической связки Co-Ni-Cr-Al. Масса перенесенного материала на стальную подложку в 1,5 раза превышает перенесенную на катод массу сплава Т15К6.

Рентгеноспектральное исследование состава электродных материалов и сформированных из них покрытий на стали 45 показало, что состав покрытий практически не отличается от состава электродных материалов, за исключением кислорода, который присутствует в покрытиях в результате проведения процесса легирования на воздухе.

Для всех электроискровых покрытий из разработанных электродных материалов, по данным электронно-микроскопических исследований поверхности, характерна морфология 2 типов: на рис. 7а показана поверхность покрытия с оплавленными частицами размером 2–20 мкм, а на рис. 7б – поверхность застывшего расплава электродного материала WC-10TiC-10Mo₂C-15Co-5Cr с микротрещинами.

На полученных электроискровых покрытиях из разработанных электродных материалов на основе WC и TiC исследованы фазовый состав, твердость по глубине покрытий, сопротивление износу в условиях абразивного трения и трения скольжения.

В табл. 5 приведен фазовый состав покрытий на стали 45 из сплавов на основе WC и TiC.

В покрытиях, полученных с использованием электрода TiC-Mo₂C-Co-Cr, при рабочем токе 0,8 и 1,3А основной фазой является карбид титана нестехиометрического состава в области гомогенности TiC_{1-x}, у которого межплоскостные расстояния уменьшились по сравнению с исходными в электродном материале, причем при 1,3А

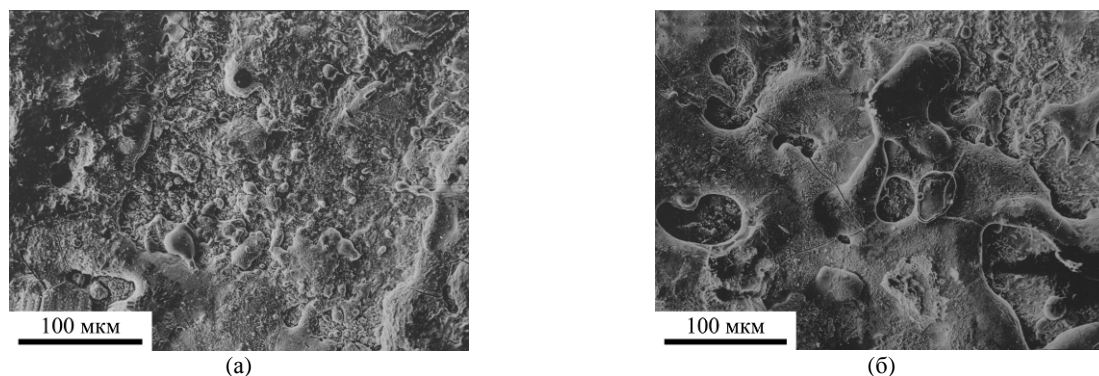


Рис. 7. Морфология поверхности покрытия из сплава WC-10TiC-10Mo₂C-15Co-5Cr: поверхность из оплавленных частиц (а) и поверхность застывшего расплава с микротрещинами (б).

это уменьшение заметнее. В покрытиях имеются также карбид хрома Cr₇C₃ (в исходном электроде наблюдали Cr₃C₂) и оксид титана Ti_xO_{2x-1}. Кроме этого, обнаружен твердый раствор титана в кобальте Co(Ti), интерметаллид Fe₂Ti.

В покрытиях с использованием электродного материала TiC-Mo₂C-TiN-Co-Cr основной фазой является карбонитрид титана TiCN. В исходном электродном материале основной по количеству фазой является TiCN, в покрытиях межплоскостные расстояния карбонитрида титана несколько уменьшились. В покрытиях наблюдается оксид титана Ti_xO_{2x-1}, количество которого при повышении рабочего тока до 1,3 А возрастает. В случае $I_p = 0,8$ А на дифрактограммах обнаружены линии отражения, которые принадлежат Co, а при $I_p = 1,3$ А – твердому раствору титана в кобальте Co(Ti). Кроме этого, в покрытии наблюдаются интерметаллиды FeTi и Co₃Ti, а при $I_p = 1,3$ А – еще, возможно, и Cr₂Ti.

Таблица 5. Фазовый состав покрытий на стали 45 из электродных материалов на основе карбидов вольфрама и титана

Электродный материал, мас.%	Фазовый состав покрытий
TiC-5Mo ₂ C-10Co-5Cr	TiC _{1-x} , Cr ₇ C ₃ , Ti _x O _{2x-1} , Co(Ti), Cr ₂ Ti
TiC-5Mo ₂ C-10TiN-12Co-5Cr	TiCN, Ti _x O _{2x-1} , Co(Ti), Co ₃ Ti, FeTi
WC-10TiC-10Mo ₂ C-15Co-5Cr	(W, Ti) _{C_{1-x}} – основная фаза, Co ₃ W ₃ C, W ₂ CO, W ₃ O, TiO ₂ , Mo ₂ C
WC-13TiC-5Co-8Ni-5Cr-2Al	(W, Ti) _{C_{1-x}} , W ₂ CO – основные фазы, Co ₃ W ₃ C, NiTiO, TiO ₂ , следы WC, TiC

Из табл. 5 видно, что при использовании электродов с участием в качестве основы карбидов W и Ti основная фаза в сформированных покрытиях – карбид (W, Ti) C_{1-x}. При использовании металлической связки Co-Ni-Cr-Al, кроме основной фазы, имеется оксикарбид вольфрама W₂(CO). Для всех рассмотренных покрытий характерно наличие оксикарбидов и оксидов

элементов, входящих в состав электродных материалов.

Результаты измерения микротвердости на поперечных сечениях сформированных покрытий показали, что при использовании электродных материалов со связкой Co-Ni-Cr-Al достигается максимальная микротвердость сформированных покрытий – 20–24 ГПа, в отличие от применения Co-Cr-связки – 12–14 ГПа. Объяснить этот факт можно за счет наличия в составе сформированных покрытий из сплавов на основе WC и TiC (Co-Ni-Cr-Al)-связки, кроме основной фазы (W, Ti) C_{1-x}, также оксикарбида W₂CO.

Испытания защитных покрытий на абразивное изнашивание проводили на лабораторной установке Х4-Б [8] при трении исследуемого образца по шкурке на бумажной основе с абразивными зёрнами SiC зернистостью P1200, что соответствует размеру зёрен основной фракции 20–14 мкм. Образец с нанесенным покрытием в виде стержня с квадратным сечением 1,7×1,7 и длиной 10 мм трется по плоской поверхности диска с закрепленной на нем абразивной шкуркой. При вращении диска со скоростью 60 об/мин происходит радиальное перемещение образца на 1 мм на одно вращение диска, при этом образец трется на 60% по свежей поверхности абразивной шкурки. Испытания исследованных покрытий проводили при нагрузке на образцы 3,0 Н и пути трения 15 м. На каждом листе абразивной шкурки проводили лишь одно испытание.

Результаты исследований (рис. 8) показали, что среди разработанных электродных материалов максимальная износостойкость против абразивного износа присуща покрытиям из сплава 5, что обусловлено максимальными значениями массопереноса с анода на катод (рис. б) и твердостью покрытия из этого материала. При этом интенсивность изнашивания этого покрытия в 2–3 раза меньше, в зависимости от пути трения, чем стали 45 без покрытия. Все покрытия из сплавов в 3–5 раз более износостойкие, чем

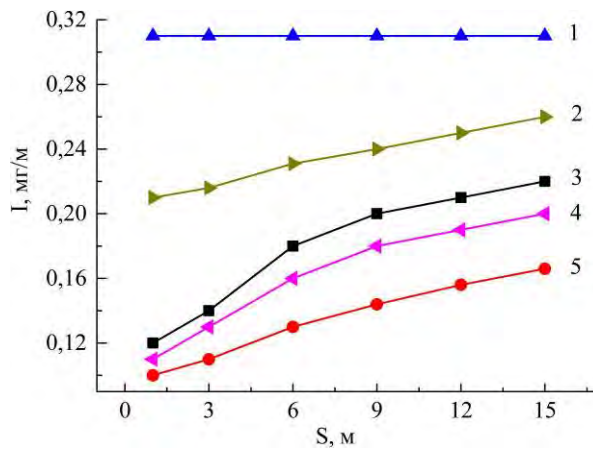


Рис. 8. Зависимость интенсивности изнашивания I от пути трения при испытании на абразивный износ электроискровых покрытий из сплавов (2–5) на стали 45 и стали 45 без покрытия: 1 – сталь 45; 2 – T15K6; 3 – TiC-10Mo₂C-10Co-5Cr; 4 – WC-10TiC-Mo₂C-20 (Co-Cr); 5 – WC-13TiC-20 (Co-Ni-Cr-Al).

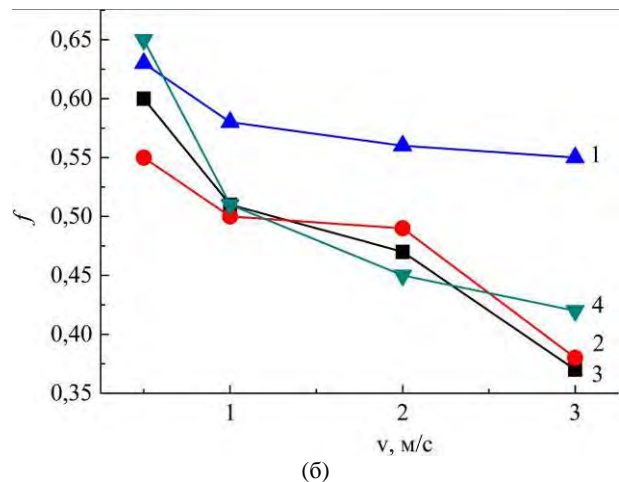
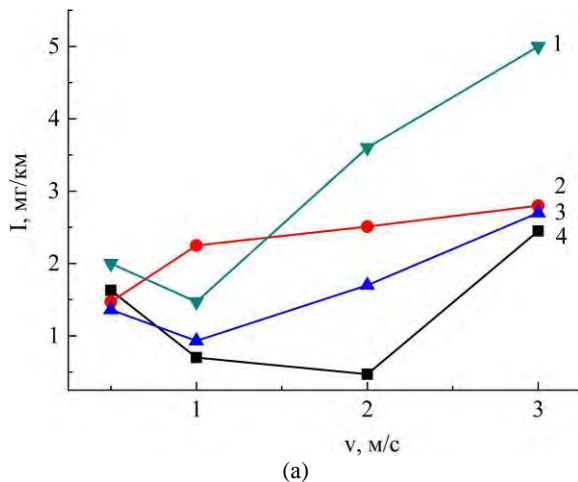


Рис. 9. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания I (а) и коэффициент трения f (б) пар трения сталь 45–электроискровые покрытия из сплавов 1–4 при пути трения 3 км: 1 – TiC-5Mo₂C-10TiN-12Co-5Cr; 2 – WC-15TiC-6Co (T15K6); 3 – WC-10TiC-10Mo₂C-20(Co-Cr); 4 – WC-13TiC-20(Co-Ni-Cr-Al).

покрытие, полученное при использовании стандартного сплава T15K6 (2).

Износостойкость, определяемая при трении об абразивную шкурку, является фундаментальной характеристикой прочностных свойств поверхностного слоя образца. Полученные результаты в сочетании с данными о твердости покрытий в сечении подтверждают эффективность электроискрового упрочнения стальных поверхностей разработанными материалами на основе карбида титана.

Проведена оценка триботехнических свойств образцов из стали 45 с электроискровыми покрытиями из разработанных сплавов и стандартного сплава T15K6. Испытания на трение и износ проведены по схеме вал-плоскость на машине трения М-22М [7] при скоростях скольжения (V) 0,5, 1, 2 и 3 м/с и нагрузке 100 Н. В качестве контртела использовали кольцо (вал) диаметром 40 мм из закаленной стали 45 (HRA 42–48) с шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 0,2$ мкм. Испытания проводили на воздухе без смазки. Путь трения составлял 3 км. Температуру в зоне контакта измеряли на расстоянии 0,3 мм от тру-

щихся поверхностей. Интенсивность изнашивания мг/км определяли путем взвешивания образца с покрытием и контртела до и после испытаний.

На рис. 9 представлены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания образцов с покрытиями при различных скоростях скольжения. Температура в зоне контакта в зависимости от скорости скольжения изменялась в диапазоне 82–275°С. Рост температуры в зоне контакта по мере увеличения скорости скольжения приводит у всех пар трения к повышению интенсивности изнашивания и снижению коэффициента трения.

Самым износостойким при скорости 2 м/с является покрытие из сплава WC-TiC-Co-Ni-Cr-Al с содержанием связки 20 мас.%. Износостойкость покрытий из разработанных сплавов, содержащих WC, существенно выше, чем из стандартного сплава T15K6.

ВЫВОДЫ

Установлено, что применение композиционных электродных материалов колмоной

(Ni-Ni₃B-Si-Cu) с карбидом вольфрама позволяет получать электроискровые покрытия толщиной до 2–4 мм и износостойкостью в 3–5 раз выше износостойкости стали 45. Исследование микроструктуры полученных покрытий показало, что их структура имеет характер тонкого конгломерата фаз на основе никеля и WC. Установлено наличие эвтектических структур в разработанных электродах. Изменяя соотношение компонентов: колмоноя и карбида вольфрама, можно получать покрытия на конструкционных сталях с широким спектром свойств. Для восстановления деталей из стали Ст3 или незакаленной стали 45 целесообразно использование покрытий из сплава, содержащего не более 25 мас.% WC. Для восстановления деталей из закаленных сталей необходимо использовать электроискровые покрытия из сплава с содержанием 50 мас.% WC.

Исследованиями установлено, что используемые для нанесения покрытий горячепрессованные электродные материалы на основе TiC и TiC–WC содержат карбиды Ti, W, Cr, Mo, ряд интерметаллидов и оксидов с размером зерен 2–10 мкм. Зернограничная фаза толщиной до 1 мкм содержит Co, Cr и Ni. Структура и состав разработанных электродных материалов позволяют получать электроискровые покрытия толщиной до 100 мкм, твердостью 20–24 ГПа. Опыты показали, что масса перенесенного на подложку материала, микротвердость, абразивная износостойкость и износостойкость при сухом трении скольжении электроискровых покрытий из разработанных сплавов существенно выше, чем покрытий, полученных при использовании стандартных сплавов ТН–20 и Т15К6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. *Газотермические покрытия из порошковых материалов*. Справочник. К.: Наукова Думка, 1987. 544 с.
2. Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Алфинцева Р.А., Кириленко С.Н., Юрченко Д.З. Оптимизация состава, структуры и свойств электродных материалов и электроискровых покрытий при упрочнении и восстановлении металлических поверхностей. *ЭОМ*. 2013, **49**(1), 4–13.
3. Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Алфинцева Р.А., Кириленко С.Н., Юрченко Д.З. Разработка электродных материалов для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных поверхностей, структура и свойства покрытий. *Электронная обработка материалов*. 2011, **47**(2), 30–36.

4. Бовкун Г.А., Ткаченко Ю.Г., Юрченко Д.З. Безвольфрамовые электродные материалы для электроискрового легирования металлических поверхностей. *ЭОМ*. 1983, **18**(5), 27–29.
5. Уманский Я.С., Трапезников А.К., Китайгородский А.И. *Рентгенография*. М.: Машгиз, 1951. 310 с.
6. Колесниченко Л.Ф., Полотай В.В., Заболотный Л.В. Методика изучения трения и износа металло-керамических материалов. *Порошковая металлургия*. 1970, (3), 61–66.
7. Полотай В. В. Машины для испытания на трение и износ. *Технология и организация производства*. 1970, (6), 86–88.
8. Хрущов М.М. О стандартизации одного из методов испытания на абразивное изнашивание. В кн.: *Методы испытания на изнашивание*. М.: Изд. АН СССР, 1962. с. 40–47.

Поступила 11.12.14

Summary

The aim of the work is to develop a technology for the electrode materials production from “colmonoy-WC” alloys and hard alloys using TiC, WC, Mo₂C, TiN, Co, Cr, Ni, and Al. Their phase composition and structure, mass-transfer kinetics, hardness and wear-resistance of electric-spark coatings made of the developed alloys were studied. The methods used included metallography and electron microscopy, X-ray phase and durometric analysis. In the “colmonoy” (Ni-Ni₃B-Si-Cu), “colmonoy-10% WC” and “colmonoy-25% WC” alloys the structure of the eutectic type was observed. When the WC content in the alloys is higher, the structure that seems to be a conglomerate of the phases of solid solution on the base of nickel and wolfram carboborosilicide was observed. At 7.5 J impulse energy, the thickness of the formed coatings was 3–4 mm. Wear-resistance of the coatings magnifies with increasing the WC content in the coatings from 64.5 μm/km for “colmonoy” up to 18.5 μm/km for 70% WC alloy, and steel wear-resistance in these conditions is 160 μm/km. It was determined that the structure and composition of the developed electrode materials from the solid alloys on the base of carbides TiC and WC allows for obtaining electro-spark coatings with the thickness up to 100 μm and hardness of 20–24 GPa. The mass of the transferred material is significantly higher than at using standard alloys Т15К6 and ТН–20. The developed materials are recommended for strengthening and renovation of the constructional steel worn parts by the electric-spark method.

Keywords: electro-spark strengthening, renovation, electrode materials, erosion properties, coating properties, wear resistance.