

Влияние параметров электроискрового разряда на физико-химические характеристики поверхности стали 45 после ЭИЛ электродами на основе WC-8%Co с добавками карбида хрома

* С. В. Николенко, А. А. Бурков, М. И. Дворник, А. В. Зайцев, Н. А. Сюй

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки,
Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН,
г. Хабаровск, 680042, Россия, * e-mail: nikola1960@mail.ru*

Описано исследование влияния параметров электроискрового разряда и электродных материалов на основе карбида вольфрама для электроискрового легирования с использованием добавок нанопорошка карбида хрома на физико-химические и эксплуатационные характеристики поверхности покрытий. Определено, что с увеличением длительности электроискрового разряда с 20 до 80 мкс стандартным твердым сплавом WC-8%Co происходит повышение шероховатости поверхности. Введение 1–5% нанопорошка ингибитора роста зерна улучшает физико-химические свойства покрытий, снижает шероховатость и увеличивает износостойкость.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электродные материалы, покрытия, карбид вольфрама, нанопорошок карбида хрома, ингибитор роста зерна, шероховатость, микроабразивный износ, импедансная спектроскопия.

УДК 669.15-194:621.9.048.4
DOI: 10.5281/zenodo.1228873

ВВЕДЕНИЕ

В литературе имеется большое количество работ, посвященных влиянию параметров электрических разрядов на формирование поверхностного слоя на электродах при электроискровом легировании (ЭИЛ) [1–4]. Однако эта проблема далеко не исчерпана и представляет не только практический и научный интерес, особенно при использовании новых электродных материалов. Современная промышленность широко использует твердые сплавы типа WC-Co при обработке металлов резанием, при бурении, деревообработке и т.д. Известно, что уменьшение размера зерна в таких сплавах приводит к увеличению механических свойств [5–6]. Высокая прочность и твердость вольфрамокобальтовых сплавов достигаются за счет состава и структуры: жесткий и твердый карбидный «скелет» пронизан тонкими прожилками пластичной кобальтовой фазы, образующей второй «скелет».

Для предотвращения роста зерна во время спекания в твердые сплавы добавляют ингибиторы роста зерна, в качестве которых обычно используют карбиды переходных металлов карбида ванадия, хрома, тантала [7–9]. В связи с этим наилучшим ингибитором роста зерна будут являться материалы, не нарушающие строения твердого сплава. В качестве такого ингибитора целесообразно использовать материал, который

не плавится, не образует соединений и твердых растворов с карбидом вольфрама и при этом растворяется в кобальте при спекании. Кроме этого, материал не должен образовывать скоплений в структуре твердого сплава, которые будут являться дефектами – концентраторами напряжений.

Одним из материалов, получаемых в нанодисперсном состоянии в достаточном количестве, является Cr_3C_2 . Данный материал не плавится и не взаимодействует с карбидом вольфрама при спекании [10–11]. Использование новых электродных материалов должно улучшить физико-химические и эксплуатационные характеристики получаемых легированных слоев.

Эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений зависят от системы параметров качества рабочих поверхностей: геометрических параметров (отклонения формы, волнистость и шероховатость поверхности); физико-механических свойств (толщина упрочненного поверхностного слоя, его строение и фазовый состав).

Одним из главных недостатков покрытий, созданных методом электроискрового легирования, является шероховатость поверхности, формирующаяся за счет локальности воздействия разрядов и неравномерности распределения перенесенного вещества. Шероховатость поверхности является одной из важнейших эксплуатационных характеристик материалов и

влияет на износостойкость, контактную жесткость, коррозионную стойкость, коэффициент трения и другие функциональные характеристики поверхности. Неровности, являясь концентраторами напряжений, снижают сопротивление усталости деталей. На грубо обработанных поверхностях, особенно в местах концентрации напряжений, быстрее возникает и распространяется коррозия металла, сопротивление усталости в этом случае снижается в несколько раз [12].

Цель проводимых исследований – разработка и создание новых электродных материалов (ЭМ), увеличивающих эффективность процесса ЭИЛ за счет уменьшения их эрозионной стойкости. Улучшение физико-химических и эксплуатационных характеристик покрытий происходит за счет введения добавки нанодисперсного порошка Cr_3C_2 , снижающего размеры зерна в спеченном твердом сплаве.

МЕТОДИКА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Процесс ЭИЛ физически основан на искровом разряде в газовой среде, при котором происходит преимущественно эрозия материала анода (А) и перенос продуктов эрозии на катод (К). На поверхности (К) образуется слой с сильно модифицированной структурой и составом, что обусловлено как перемещением материала, так и действием импульсных тепловых и механических нагрузок, возникающих при воздействии искрового разряда (рис. 1).

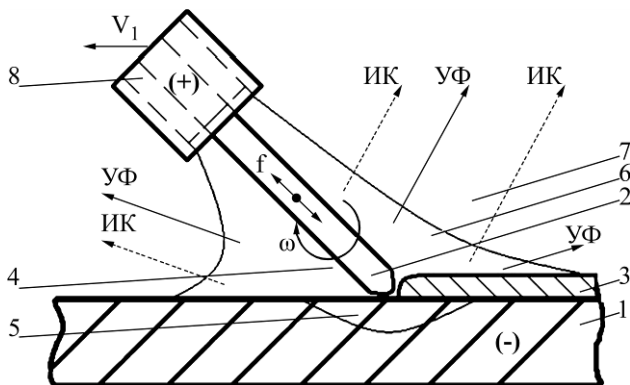


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ЭИЛ: 1 – материал основы (катод); 2 – электрод (анод); 3 – легированный слой (покрытия); 4 – плазма разряда; 5 – зона термического влияния (ЗТВ); 6 – инертный газ; 7 – воздух; 8 – держатель электрода; УФ – ультрафиолетовое излучение; ИК – инфракрасное излучение.

Электродные материалы на основе карбида вольфрама получали методами порошковой металлургии. Порошок WC-Co со средним размером частиц 2,8 мкм смешивали с нанопорошком карбида хрома в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 15 мин при

частоте вращения 250 мин^{-1} ; отношение массы шаров к массе материала 4:1. Полученную смесь прессовали под давлением 145 МПа и затем спекали в условиях высокого разрежения под давлением 10 Па. Выдержка при температуре 1440°C составляла 1 ч.

Основным механизмом роста зерен, который происходит при спекании сплава WC-8\% Co , является перекристаллизация через жидкую фазу [13]. Одним из следствий роста зерен по данному механизму становится наличие четкой огранки у зерен WC , которая появляется, когда растворенные в жидкой фазе атомы вольфрама и углерода осаждаются на имеющихся зернах WC (рис. 2а).

Другим механизмом роста зерен в твердом сплаве можно назвать срастание, в результате которого несколько зерен объединяются в одно крупное зерно. Так образуются наиболее крупные зерна, являющиеся концентраторами напряжений и снижающие прочность сплава. Третья фаза (Cr_3C_2) покрывает зерна карбида вольфрама и препятствует срастанию зерен. Многие зерна WC в сплаве с добавкой карбида хрома не имеют четких ровных граней (рис. 2б). Это означает, что Cr_3C_2 препятствует растворению и осаждению вольфрама и углерода на зернах WC , затрудняя рост зерен через перекристаллизацию и приводят к уменьшению среднего диаметра зерен WC с 1,6 до 0,8 мкм.

В процессе ЭИЛ определялось изменение массы катода – стали 45 – и эрозии анодов от удельного времени легирования с различными электрическими параметрами. Обработка велась электрическими импульсами прямоугольной формы от специально разработанного генератора импульсов модели IMES при следующих электрических параметрах (табл. 1).

Исследовали временные зависимости суммарных и удельных эрозий анода, а также суммарных и удельных привесов катода с точностью до 10^{-4} г. Плотность электродов и осаждаемого материала принималась равной $14,5 \text{ г/см}^3$. Эффективность процесса формирования покрытия рассчитывалась по формуле $\gamma = \Sigma \Delta_k K_{cp} t_x$ ($\text{см}^3/\text{мин}$). Здесь t_x – порог хрупкого разрушения покрытия, то есть время обработки, после которого возникает отрицательный удельный привес катода; K_{cp} – коэффициент переноса материала за время t_x , равный отношению $K_{cp} = \Delta_k / \Delta_a$, где Δ_k и Δ_a – привес катода и эрозия анода за каждую последующую минуту легирования.

Для измерения микропрофиля покрытия использовали измеритель шероховатости TR200 фирмы TIME GROUP. Профилометр позволяет определить основные параметры, характери-

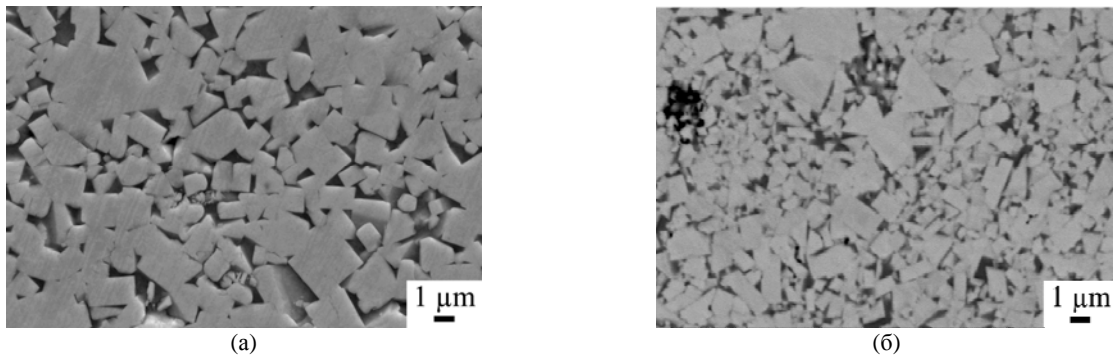


Рис. 2. Структура сплава WC-8%Co – (а), структура сплава WC-8%Co с добавкой 1% нанодисперсного порошка Cr_3C_2 – (б).

Таблица 1. Электрические параметры установки электроискрового легирования IMES

Электрические параметры	Длительность искровых разрядов, мкс				
	10	20	40	60	80
I_p , А	160	180	195	210	225
U , В	40	40	40	40	40
Частота импульсов, Гц	500	500	500	500	500

зующие шероховатость поверхности, предусмотренные ГОСТ 2789 – 73. Диапазон измерений 160 мкм. Материал пера – алмаз. Радиус кончика пера 5 мкм. Сигнал первичного профиля подвергался фильтрации с целью устранения волнистости. Средняя линия выбиралась с помощью алгоритма наименьших квадратов. Исследовали параметры R_a (среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля от средней линии); R_y (максимальный перепад высот между самой верхней и нижней точками поверхности профиля); R_z (сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины); R_p (наибольшая высота профиля), асимметрия профиля S_k , опорная длина профиля t_p и средний шаг неровностей профиля S_m . Анализ микрогеометрии профиля проводился с помощью программного обеспечения Data View. Перед замером калибровка прибора была осуществлена на прилагаемом к нему образце шероховатости, отклонение составило 0,2%.

Гранулометрический анализ продуктов эрозии осуществлялся по методике [14] с помощью оптического микроскопа Altami. Исследования покрытий на микроабразивный износ проводили на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося корундового шарика диаметром 20 мм на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы Al_2O_3 ($d \sim 6$ мкм). Испытание на износ проводили по схеме «шар – плоскость» при наклонном расположении образца с прижатием к нему вращающегося шарика за счет собственной массы [15]. После проведения испытаний диаметр эрозионной лунки измеряли с применением оптического микроскопа МБС-10.

Фазовый состав покрытий исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Для расшифровки дифрактограмм использовали программное обеспечение PDWin. Гранулометрический анализ нанопорошка Cr_3C_2 проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа ZEISS Libra-120. В результате экспериментов и обработки полученных результатов были установлены зависимости величины шероховатости и микроабразивного износа от энергии и длительности импульсов. Все остальные настраиваемые режимы установки оставались постоянными.

Исследования импедансной спектроскопии проводились в трехэлектродной ячейке в перемешиваемом растворе 3% NaCl в условиях естественной аэрации при комнатной температуре. Раствор NaCl был приготовлен из реактива марки «хч» и деионизованной воды. После погружения в раствор образцы выдерживались 20 минут до установления стационарного значения потенциала коррозии. После этого измерялся спектр импеданса в диапазоне частот f от 100000 до 1 Гц при амплитуде переменного сигнала 100 мВ на установке Z-2000 (Элинс, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность процесса ЭИЛ зависит от объема, гранулометрического и фазового состава материала, выносимого из эрозионной лунки анода под воздействием электрического разряда и осаждаемого на поверхности обрабатываемой детали – катода. Гранулометрический анализ продуктов эрозии при искровом разряде указывает на наличие двух форм: шарообразной (или

Таблица 2. Гранулометрический состав продуктов эрозии электродного материала системы WC-8%Co с добавками Cr₃C₂ при ЭИЛ стали 45

Электрод	Длительность, мкс	Средний диаметр частиц, мкм		Количественная доля сферических частиц, %	Количественная доля осколочных частиц, %
		сферических	осколочных		
WC-8%Co	20	41,9	58,9	29,7	70,3
WC-8%Co	80	58,9	79,1	28,4	71,6
WC-8%Co+1%Cr ₃ C ₂	20	45,7	87	19,8	80,2
WC-8%Co+1%Cr ₃ C ₂	80	67,6	122,3	45,7	54,3
WC-8%Co+3%Cr ₃ C ₂	20	76,2	126,3	24,3	75,7
WC-8%Co+3%Cr ₃ C ₂	80	72,7	119,3	67,1	32,9
WC-8%Co+5%Cr ₃ C ₂	20	65,2	107,7	35,1	64,9
WC-8%Co+5%Cr ₃ C ₂	80	94,4	148,2	56,4	43,6

близкой к ней) и неправильной формы с рваными краями. Это может быть обусловлено действием разных механизмов: в первом случае – формирование из жидкой фазы, во втором – из твердой фазы в процессе хрупкого разрушения материала анода. Как известно, реакционная способность жидкости выше, чем твердых тел, поэтому надо стремиться к большему содержанию жидкофазных частиц в продуктах с целью формирования легированных слоев с более высокими физико-химическими и эксплуатационными характеристиками.

В табл. 2 показаны данные гранулометрического состава продуктов эрозии электродных материалов. Следует отметить, что содержание частиц твердой фазы выше 50–60% ухудшает качество формируемого покрытия [16]. Смачиваемость с катодом жидкофазной составляющей анода и уменьшение размеров продуктов его эрозии приводят к росту адгезии, плотности и твердости покрытий. Данные гранулометрического анализа исследуемых продуктов эрозии показывают, что они в основном представлены частицами хрупкого разрушения – более 70%. Размер частиц обеих фракций увеличивается с ростом времени разряда, что обусловлено большим разогревом материала анода плазмой разряда. При увеличении длительности импульсов с 20 до 80 мкс растет доля жидкофазных частиц, что объясняется большим временем взаимодействия частиц карбида вольфрама с железом подложки. При внесении в твердый сплав Cr₃C₂ (в пределах от 1 до 5%) растет доля шарообразных частиц, имеющих жидкофазное происхождение. Это происходит из-за уменьшения размера карбидной фазы в составе электродов, что ускоряет ее взаимодействие с железом в условиях ограниченного времени разряда.

Очевидно, что величина привеса катода существенным образом обусловлена эрозионными свойствами ЭМ. С этой целью были изучены временные зависимости удельной и суммарной эрозии анода в процессе легирования стали 35 электродами – WC-8%Co с добавкой Cr₃C₂ от 1 до 5%. Минимальная суммарная эрозия анода с 1 и 5% добавкой Cr₃C₂ наблюдается при длительности импульсов 20 и 10 мкс соответственно, тогда как уже при длительности 80 мкс эрозия становится максимальной.

Параметры процесса ЭИЛ на стали 45 с помощью исследуемых электродных материалов представлены в табл. 3.

Эрозия материала анода возрастает с увеличением длительности, что согласуется с данными монографии [1]. Порог хрупкого разрушения покрытий за время ЭИЛ 10 мин/см² не достигнут у сплавов с добавкой карбида хрома, кроме образца WC-8%Co + 5%Cr₃C₂, осаждаемого при τ = 80 мкс. Максимальная суммарная эрозия и суммарный привес катода получены у сплава с добавкой 3% карбида хрома. Сравнительный анализ показывает, что эффективность процесса формирования покрытий ЭМ с добавками 1, 3 и 5% Cr₃C₂ существенно возрастает. Также увеличивается коэффициент массопереноса, кроме образца WC-8%Co + 5%Cr₃C₂.

Металлографический анализ поперечного шлифа катода после ЭИЛ ЭМ на основе карбида вольфрама с 1% добавкой карбида хрома выявил, что сформировано качественное покрытие (рис. 3а). В приведенном изображении образца отсутствуют поры и микротрещины. Распределение железа в покрытии имеет равномерный характер. В переходном слое концентрация железа увеличивается по мере приближения к подложке с 20 до 90 масс.% (рис. 3б). Вольфрам

Таблица 3. Параметры процесса ЭИЛ стали 45

Длительность, мкс	$\sum \Delta k \times 10^{-4}, \text{ см}^3$ за время t_x	$\sum \Delta a \times 10^{-4}, \text{ см}^3$ за время t_x	$t_x, \text{ мин}$	K_{cp}	$\gamma \times 10^{-4}, \text{ см}^3/\text{мин}$
Электрод WC-8%Co					
20	2,6	6,64	10	0,39	10,14
40	7,33	15,48	10	0,47	32,99
60	7,67	15,34	9	0,50	33,13
80	5,14	11,09	6	0,46	10,49
Электрод WC-8%Co + 1% Cr ₃ C ₂					
20	4,86	9,15	10	0,53	25,79
40	7,11	12,25	10	0,58	41,29
60	7,25	13,17	10	0,55	39,95
80	10,35	15,99	10	0,65	67,04
Электрод WC-8%Co + 3% Cr ₃ C ₂					
20	2,33	5,33	10	0,44	10,21
40	3,92	6,67	10	0,59	23,01
60	4,42	8,75	10	0,50	22,29
80	13,25	18,00	10	0,74	97,53
Электрод WC-8%Co + 5% Cr ₃ C ₂					
20	5,39	13,03	10	0,41	22,31
40	8,98	24,35	10	0,37	33,15
60	10,15	27,67	10	0,37	37,25
80	9,25	45,37	7	0,20	13,21

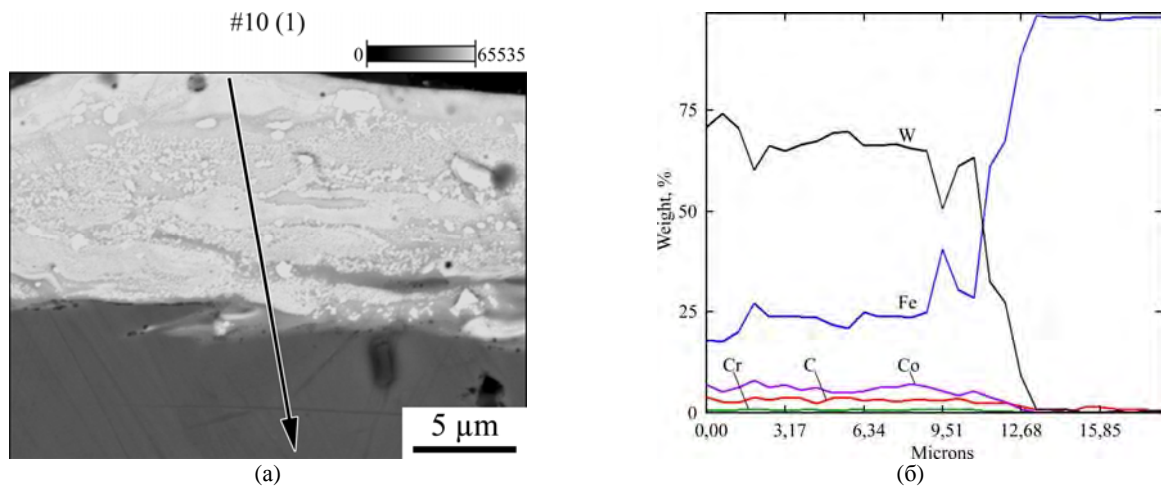


Рис. 3. Фото шлифа СЭМ, где где (а) – микроструктура покрытия, полученного после ЭИЛ стали 45 материалом на основе карбида вольфрама с 1% добавкой карбида хрома; (б) – концентрационные кривые распределения элементов в покрытии.

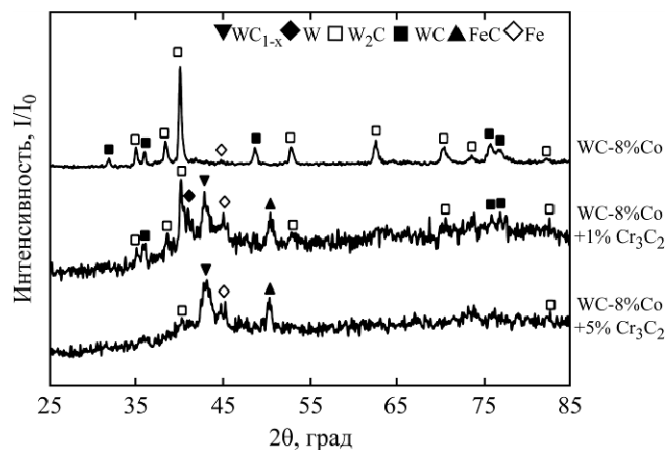


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы покрытий методом ЭИЛ на стали 45 ЭМ на основе карбида вольфрама при длительности 60 мкс.

Таблица 4. Характеристики шероховатости покрытий, полученных при ЭИЛ стали 45

Образец	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм
WC-8%Co 80 мкс	9,47	19,95	49
WC-8%Co+1Cr ₃ C ₂ 20 мкс	3,38	10,75	23,90
WC-8%Co+1Cr ₃ C ₂ 80 мкс	4,78	14,18	33,72
WC-8%Co+3Cr ₃ C ₂ 20 мкс	4,34	11,52	31,37
WC-8%Co+3Cr ₃ C ₂ 80 мкс	4,76	15,85	36,74
WC-8%Co+5Cr ₃ C ₂ 20 мкс	4,56	15,69	31,84
WC-8%Co+5Cr ₃ C ₂ 80 мкс	7,99	16,52	48,30

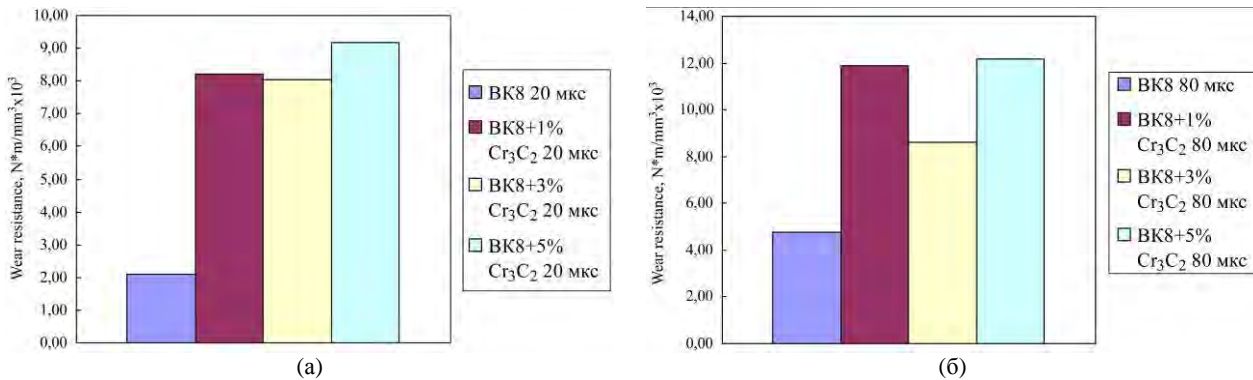


Рис. 5. Износостойкость покрытий из сплава WC-8%CO и сплавов WC-8%CO с добавкой мелкодисперсного порошка карбида хрома 1, 3 и 5% на стали 45: (а) – с длительностью импульсов 20 мкс; (б) – с длительностью импульсов 80 мкс.

равномерно распределен по всему слою. На СЭМ-изображении можно наблюдать зерна карбида вольфрама (0,5–20 мкм) в виде светлых включений, которые окружает матрица из FeWCoCCr.

Мелкие светло-серые пятна (0,5–1 мкм) представляют собой зародыши продуктов частичной кристаллизации матрицы, возникшие в процессе остывания области воздействия разряда на катоде. Наличие светло-серых гомогенных областей указывает на присутствие аморфной фазы в покрытии, возникшей в результате высоких скоростей охлаждения поверхности катода (10^5 – 10^7 К/с) в ходе разряда [17]. Рентгенофазовый анализ покрытий показывает повышение доли аморфной фазы в покрытиях с увеличением добавки (рис. 4).

Тепловое воздействие вызывает разложение WC при ЭИЛ за счет его взаимодействия с железом подложки и кислородом окружающей среды. Основу стандартного покрытия из WC-8%Co составляет субкарбид вольфрама типа W_2C с мелкими включениями WC. При грубом ЭИЛ последовательно инициируется реакция обезуглероживания: $WC \rightarrow W_2C \rightarrow W$. Аналогичные химические реакции усугубляются при увеличении как частоты разрядов, так и времени легирования [18].

Таким образом, необходимый для твердосплавного анода высокоэнергетический режим ЭИЛ сопряжен с процессами окисления, обезуглероживания, сопровождается формированием «вторичной структуры», состоящей из смеси

карбидов различной стехиометрии (WC, WC_{1-x} , W_2C , FeC) и даже металлического W.

Было проведено сравнительное исследование характеристик шероховатости и микроабразивного износа покрытий и стали 45. Характеристики шероховатости покрытий представлены в табл. 4, из которой видно, что добавка карбида хрома в электродный материал существенно снижает параметры шероховатости поверхности.

Износостойкость покрытий к микроабразивному износу показана на рис. 5. Полученные данные хорошо иллюстрируют повышение износостойкости покрытий с увеличением длительности импульсов и содержанием добавки карбида хрома. Видно, что наилучшей износостойкостью обладает покрытие с 5% добавкой, полученное при длительности импульсов 80 мкс.

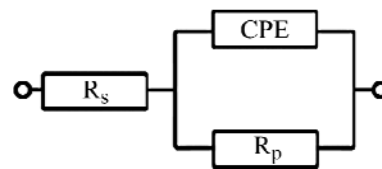


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема для анализа спектра импеданса.

Спектры импеданса WC-8%Co+Cr₃C₂ покрытий и стали 45 были установлены с использованием эквивалентной ячейки, схема которой показана на рис. 6. Компоненты ячейки CPE, R_p и R_s представляют собой элемент постоянной фазы, сопротивление переноса заряда и сопротивление раствора соответственно. Импеданс CPE может быть выражен через уравнение:

Таблица 5. Параметры эквивалентной ячейки для покрытий на основе WC-8%Co добавками карбида хрома на стали 45

Образец	A (mF·cm ⁻²)	N	R_s (Ω·cm ⁻²)	R_p (MΩ·cm ⁻²)
WC-8%Co 500 Гц 20 мкс	3,98	0,74	6,4	3,2
WC-8%Co 500 Гц 80 мкс	4,21	0,77	6,5	1,85
WC-8%Co+1% Cr ₃ C ₂ 20 мкс	2,85	0,63	6,7	6,71
WC-8%Co+1% Cr ₃ C ₂ 80 мкс	3,62	0,57	6,4	5,93
WC-8%Co+3% Cr ₃ C ₂ 20 мкс	2,27	0,74	7,5	7,95
WC-8%Co+3% Cr ₃ C ₂ 80 мкс	2,48	0,57	6,4	7,69
WC-8%Co+5% Cr ₃ C ₂ 20 мкс	3	0,59	8,1	8,74
WC-8%Co+5% Cr ₃ C ₂ 80 мкс	5,95	0,57	6,2	5,41

$Z_{CPE} = [A(j\omega)^n]^{-1}$, где n – показатель степени, который может быть между 0 и 1, ω и A представляют собой частоту и константу CPE соответственно. Предложенная эквивалентная схема удовлетворительно описывала экспериментальные спектры импеданса изучаемых объектов в рабочем растворе.

Параметры n и A связаны с толщиной и пористостью/шероховатостью барьерной пленки покрытий соответственно. Емкостный параметр A снижается у покрытий при внесении даже 1% карбида хрома в состав электродов на основе WC-8%Co. Это говорит об улучшении барьерных свойств. Характерно, что параметр A был выше для покрытий, осажденных при больших длительностях разрядов (τ), что связано с аналогичной зависимостью шероховатости поверхности описываемых образцов от τ (табл. 4). Параметр n у покрытий с добавкой карбида хрома был ниже по сравнению с традиционными WC-8%Co покрытиями, что говорит о меньшей толщине барьерной пленки модифицированных покрытий. Значения сопротивлений коррозии R_p покрытий при введении карбида хрома в среднем в 3–4 раза выше, чем при использовании стандартного сплава WC-8%Co (табл. 5). Таким образом, добавка карбида хрома в состав электродных материалов на основе WC-8%Co повышает электроизоляционные свойства и коррозионную устойчивость осажденных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение процесса формирования электроискровых покрытий на стали 45 типовым сплавом WC-8%Co и сплавом WC-8%Co с 1, 3 и 5% добавки нанопорошка карбида хрома позволило установить, что добавка Cr₃C₂ в количестве 1–5 масс.% в WC-8% Co увеличивает количество продуктов эрозии сферической формы, образованных из жидкофазной составляющей, что

обеспечивает повышение коэффициента массопереноса и эффективности процесса формирования покрытий. Введение добавки мелкодисперсного порошка Cr₃C₂ в количестве 1, 3 и 5% в электродные материалы на основе WC-8%Co повышает износостойкость, электроизоляционные свойства и коррозионную устойчивость осажденных покрытий, а также снижает параметры их шероховатости. Установлено, что оптимальная длительность искрового воздействия находится в пределах 20–80 мкс.

Авторы благодарят Е.Р. Зайкову (Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН) за помощь в проведении исследований гранулометрического состава продуктов эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров А.Д. *Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей*. Владивосток: Дальнаука, 1992. 180 с.
2. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E. et al. *Surf Coat Technol.* 2008, **202**, 3715–3722.
3. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. *Новые электродные материалы для электроискрового легирования*. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.
4. Химухин С.Н., Ри Хосен, Верхотуров А.Д., Ри Э.Х. *Формирование структуры слоя на металлах и сплавах при электроискровой обработке*. Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2010. 239 с.
5. Дворник М.И., Зайцев А.В. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2017, (2), 39–46.
6. Siwak P., Garbicz D. *Trans Nonferrous Met Soc China*. 2016, **26**(10), 2641–2646.
7. Панов В.С., Чувилин А.М. *Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них*. М.: МИСИС, 2001. 452 с.
8. Третьяков В.И. *Основы материаловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов*. М.: Металлургия, 1976. 512 с.

9. Hayashi K., Fuke Y. & Suzuki H. *J Jpn Soc Powder & Powder Metall.* 1972, **19**, 67–71.
10. Mikael Christensen, Goran Wahnstrom. *Int J Refract Metals Hard Mater.* 2006, **24**, 80–88.
11. Yamamoto T., Ikuhara Y., Watanabe T., Sakuma T. et al. *J Mater Sci.* 2001, **36**, 3885–3890.
12. Kim B.K., Ha G.H., Lee D.W., Lee G.G. *Adv Perform Mater.* 1998, (5), 341–352.
13. Chabretou V., Allibert C.H., Missiaen J.M. *J Mater Sci.* 2003, **38**, 2581–2590.
14. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. *Метрология, стандартизация, сертификация.* М.: Логос, 2003. 596 с.
15. Kusano Y., Acker K. Van, Hutchings I.M. *Surf Coat Technol.* 2004, **183**(2–3), 312–327.
16. Намитокоев К.К. *Украинский физический журнал.* 1962, (10), 1136–1139.
17. Li Q.H., Yue T.M., Guo Z.N., Lin X. *Metall Mater Trans A.* 2013, **44A**, 1767–1778.
18. Burkov A.A., Pyachin S.A. *Solid State Phenom.* 2014, **213**, 131–136.

Поступила 18.01.18

Summary

The work is devoted to the investigation of the influence of the electric spark discharge parameters and electrode materials based on tungsten carbide for electric spark alloying using chromium carbide nanopowder additives, on the physico-chemical and operational characteristics of the coating surface. It is determined that an increase in the surface roughness occurs with an increase in the duration of an electric spark discharge from 20 to 80 μs with a standard WC-8% Co hard alloy. Introduction of the 1–5 wt.% nanopowder of the grain growth inhibitor improves the physicochemical properties of coatings, reduces surface roughness and increases wear resistance.

Keywords: electrospark alloying, electrode materials, coatings, tungsten carbide, chromium carbide nanopowder, grain growth inhibitor, roughness, micro abrasive wear, impedance spectroscopy.