

Влияние параметров электроискрового разряда на шероховатость и микроабразивный износ поверхности стали 45 после ЭИЛ электродами на основе TiC

*С. В. Николенко^а, **А. Д. Верхотуров^б, *Н. А. Сюй^а, ***Е. Н. Кузьмичев^с

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,

ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия, *e-mail: nikola1960@mail.ru

^бФедеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, **e-mail: verhoturov36@mail.ru

ул. Ким-Ю-Чена, г. Хабаровск, 680000, Россия

^сДальневосточный государственный университет путей сообщений,

ул. Серышева, 47, г. Хабаровск, 680021, Россия, ***e-mail: e_kuzmichev@mail.ru

Исследовано влияние параметров электроискрового разряда и электродных материалов для электроискрового легирования с использованием добавок борсодержащего минерального сырья на характеристики микрогеометрии и значения микроабразивного износа поверхности покрытий. Определено, что с увеличением длительности электроискрового разряда с 20 до 80 мкс происходит повышение шероховатости поверхности. Введение 1–2% борсодержащего сырья улучшает физико-химические свойства легированного слоя, снижает шероховатость и увеличивает износостойкость.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электродные материалы, карбид титана, датолитовый концентрат, шероховатость, микроабразивный износ.

УДК 669.15-194:621.9.048.4

ВВЕДЕНИЕ

В литературе имеется большое количество работ по 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 для исследований новых установок с регулируемыми параметрами искрового разряда, а также новых электродных материалов.

Перспективным для ЭИЛ сталей является использование в качестве электродных материалов (ЭМ) твердых сплавов на основе карбида титана, который характеризуется высокими значениями твердости, износостойкости, тугоплавкости и т.д. Известен ряд работ [5–9] по созданию ЭМ из безвольфрамовых твердых сплавов карбида титана со связками Ni-Mo, Ni-Cr, Ni-Cr-Mo. Наиболее равномерный и износостойкий слой был получен при легировании твердыми сплавами, содержащими 20–30% связки Ni-Mo.

При создании ЭМ необходимо учитывать влияние межэлектродной среды и возможность образования карбидных и боридных фаз непосредственно в процессе легирования. Для уменьшения образования оксидных пленок в формируемой поверхности целесообразно в

состав электрода вводить компоненты, выполняющие роль флюсов (бор, кремний, кальций, марганец, щелочные металлы). В качестве флюсов рационально введение минеральных ассоциаций, выполняющих одновременно роль микролегирующих добавок поверхностного слоя. Введение бора также целесообразно с целью уменьшения эрозионной стойкости легирующих электродов [5, 10]. В этом аспекте представляет интерес использование в ЭМ добавок датолитового концентрата (ДТК).

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 концен-

траторами 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 [11].

Цель проводимых исследований – изучение влияния изменения параметров электроискрового разряда, а также влияния содержания ДТК в электродных материалах на шероховатость и микроабразивный износ поверхности покрытий.

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).

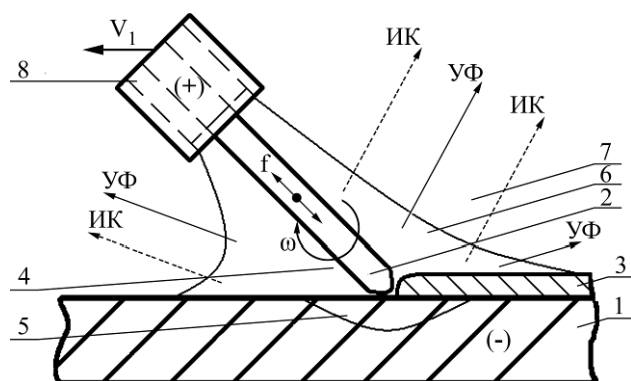


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ЭИЛ: 1 – материал основы (катод); 2 – электрод (анод); 3 – легируемый слой (ЛС); 4 – плазма разряда; 5 – зона термического влияния (ЗТВ); 6 – инертный газ; 7 – воздух; 8 – держатель электрода; УФ – ультрафиолетовое излучение; ИК – инфракрасное излучение.

Шихту для ЭМ на основе TiC изготавливали из реакционной смеси порошков титана, никеля, молибдена, датолитового концентрата и сажи путем смешения шихты в шаровой мельнице в течение 4 часов. Готовую шихту формовали в цилиндрические заготовки в пресс-форме предварительного прессования. Электроды получали в установке для СВС-экструзии (лаборатория СВС-экструзии, ИСМАН – г. Черноголовка). Ниже приведены обозначения электродных материалов на основе карбида титана с добавкой борсодержащего минерального сырья: Д0 – 70% TiC + 30% (Ni + Mo); Д2 – 70% TiC + 29% (Ni + Mo) + 1,0% ДТК; Д4 – 70% TiC + 28% (Ni – Mo) + 2,0% ДТК.

В процессе ЭИЛ определялось изменение массы катода – стали 45 и эрозии анодов от удельного времени легирования с различными электрическими параметрами.

Обработка велась электрическими импульсами от специально разработанного генератора импульсов модели “IMES” с возможностью управления от встроенного контроллера или внешнего компьютерного устройства [12] при электрических параметрах, представленных в табл. 1.

Исследовали временные зависимости суммарных и удельных эрозий анода, а также суммарных и удельных привесов катода. Эффективность процесса формирования легированного слоя (ЛС) рассчитывалась по формуле $\gamma = \Sigma \Delta_k K_{cp} t_x$, (см³/мин). Здесь t_x – порог хрупкого разрушения ЛС, то есть время обработки, после которой 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 использовался измеритель шероховатости TR200 фирмы TIME GROUP. Профилометр позволяет определить основные параметры, характеризующие шероховатость поверхности и предусмотренные ГОСТом 2789–73 [13]. 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 DataView for TR200. Перед замером калибровка прибора была осуществлена на прилагаемом к нему образце шероховатости, отклонение составило 0,2%.

Гранулометрический анализ продуктов эрозии осуществлялся по методике [14] на микроскопе МБС-10. Исследования легированного слоя на микроабразивный износ проводили на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося стального шарика на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы [14].

Таблица 1. Электрические параметры установки электроискрового легирования IMES

Электрические параметры	Длительность искровых разрядов, мкс			
	20	40	60	80
I_p , А	180	195	210	225
U , В	40			
Частота импульсов, Гц	400			
Скважность	125	63	42	31
E , Дж	0,144	0,312	0,504	0,72

Примечание. I_p – рабочий ток; U – напряжение; E – энергия единичного разряда.

Металлографический анализ шлифов легированных слоев проводился на микроскопе ММР-2Р, дюрометрический – на микротвердометре ПМТ-3М с нагрузкой 50 Н.

Фазовый состав покрытий исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Для расшифровки дифрактограмм использовали программное обеспечение PDWin. Фазовый анализ проводили также с помощью просвечивающего электронного микроскопа ZEISS Libra-120, оснащенного HAADF-детектором и энергетическим Ω -фильтром. Исследования проводились в режимах на просвет, темного поля и электронной микродифракции. Образцы для просвечивающей микроскопии подготавливались методом электролитической полировки и ионным травлением.

Исследования ЛС на микроабразивный износ проводили на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося стального шарика на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы. Испытание на износ проводили по схеме «шар-плоскость» при наклонном расположении образца с прижатием к нему за счет собственной массы вращающегося шарика. Износ обеспечивается добавлением абразивной суспензии, содержащей взвешенные в масле МС 20 частички Al_2O_3 ($d_{cp} \approx 6$ мкм). После проведения испытаний диаметр эрозионной лунки измеряли, применяя оптический микроскоп МБС-10.

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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность процесса ЭИЛ тем выше, чем большее количество материала анода разрушится и закрепится на поверхности катода за единицу времени.

Учитывая, что установление общих закономерностей эрозии металлов и тугоплавких соединений при ЭИЛ металлических поверхно-

стей невозможно без анализа состава продуктов эрозии, были выполнены исследования продуктов эрозии материалов системы TiC-Ni-Mo-ДТК, позволившие определить характер разрушения материала анода. В табл. 2 показаны данные гранулометрического состава продуктов эрозии ЭМ. Из данных табл. 2 видно, что при ЭИЛ стали 45 продукты эрозии в основе своей представлены частицами хрупкого разрушения.

При этом введение ДТК до 1–2% (Д2, Д4) увеличивает процентное содержание жидкофазной составляющей продуктов эрозии в сравнении со сплавом Д0, а также повышается количество сферических частиц с увеличением длительности импульсов с 20 до 80 мкс.

Исследуя влияние содержания ДТК на кинетику процесса ЭИЛ, установили, что добавка датолитового концентрата в электродный материал существенно влияет на характеристики массопереноса (табл. 3).

Для сплавов системы TiC-Ni-Mo-ДТК с повышением содержания добавки суммарная эрозия анода и привес катода повышаются. Очевидно, что введение добавки концентрата снижает эрозионную стойкость сплавов TiC-Ni-Mo за счет охрупчивающего влияния оксидных компонентов, которые сегрегируют по границам зерен, ослабляя межзеренные контакты. Анализ параметров массопереноса показал, что при содержании ДТК до 2 масс.% повышение привеса катода объясняется увеличением доли эрозии электрода в жидкой фазе, что хорошо коррелирует с данными о продуктах эрозии.

Анализ значений удельного привеса катода Δ_k и удельной эрозии анода Δ_a показал, что во всех случаях наблюдается положительное значение привеса катода. Максимальные значения эрозии анода и привеса катода наблюдаются при ЭИЛ с временем легирования 1 мин/см² обрабатываемой поверхности. При повышении времени легирования наблюдается закономерное уменьшение значений Δ_k , Δ_a . Это связано с тем, что на поверхности анода образуется устойчивая «вторичная структура», снижающая значения Δ_a и соответственно Δ_k . Анализ зависимостей $\Delta_a = f(t)$, $\Delta_k = f(t)$ свидетельствует о циклическом харак-

Таблица 2. Гранулометрический состав продуктов эрозии электродного материала системы TiC-Ni-Mo-ДТК при ЭИЛ стали 45

Электрод	Длительность, мкс	Средний диаметр частиц, мкм		Количественная доля сферических частиц, %	Количественная доля осколочных частиц, %
		сферических	осколочных		
Д0	20	11,02	33,14	18,1	81,9
Д0	80	9,74	40,32	23,7	76,3
Д2	20	8,17	24,62	25,4	74,6
Д2	80	7,74	23,74	45,2	54,8
Д4	20	10,66	22,17	17,9	82,1
Д4	80	6,93	27,56	44,6	55,4

Таблица 3. Параметры процесса механизированного ЭИЛ стали 45, частота 400 Гц

Длительность, мкс	$\sum \Delta k \times 10^{-4}$, см ³ за время t_x	$\sum \Delta a \times 10^{-4}$, см ³ за время t_x	t_x , мин	K^{cp} , мин ⁻¹	$\gamma \times 10^{-4}$, см ³ /мин
Электрод Д0					
20	1,13	7,59	9	0,16	1,63
40	1,42	10,21	10	0,14	1,99
60	2,13	12,91	10	0,16	3,41
80	2,48	15,18	10	0,17	4,22
Электрод Д2					
20	1,06	4,68	10	0,21	2,23
40	2,55	7,38	10	0,35	8,93
60	3,48	11,06	10	0,32	11,14
80	3,97	12,2	10	0,32	12,70
Электрод Д4					
20	2,24	6,98	10	0,32	7,17
40	3,75	10,63	10	0,35	13,13
60	6,97	15,35	10	0,45	31,37
80	7,12	19,47	10	0,37	26,34

Таблица 4. Характеристики покрытий, полученных при ЭИЛ стали 45

Материал электрода	Микротвердость H_{μ}^{50} , ГПа		Толщина слоя, Мм	Сплошность, %	$K_{упр}^*$
	Слой	Основа			
Д0 20 мкс	7,83 ± 1,31	2,55 ± 0,1	0,02–0,035 ср. 0,012 ± 0,002	72	3,07
Д0 80 мкс	7,09 ± 0,95	2,46 ± 0,16	0,02–0,057 ср. 0,018 ± 0,005	81	2,88
Д2 20 мкс	8,23 ± 0,15	2,33 ± 0,1	0,02–0,037 ср. 0,009 ± 0,002	82	3,53
Д2 80 мкс	13,85 ± 2,1	2,26 ± 0,15	0,02–0,105 ср. 0,020 ± 0,006	91	6,13
Д4 20 мкс	9,95 ± 0,75	2,75 ± 0,13	0,02–0,030 ср. 0,009 ± 0,001	93	3,61
Д4 80 мкс	10,53 ± 1,15	2,45 ± 0,19	0,02–0,058 ср. 0,014 ± 0,003	97	4,3

$K_{упр}^*$ – коэффициент упрочнения, равный отношению $H_{\mu}^{лс} / H_{\mu}^{основа}$, где H_{μ} – микротвердость легированного слоя и основы соответственно.

тере хрупкого разрушения материала анода. Циклический характер изменения эрозии анода связан с образованием «вторичной структуры», которая с повышением времени обработки характеризуется увеличением плотности дислокаций и образованием экранирующей фазы на аноде. Внешние термомеханические воздействия, а также релаксация напряжений приводят

к увеличению эрозионной способности электродного материала и разрушению «вторичной структуры».

Из данных табл. 3 видно, что при 1% ДТК в TiC-Ni-Mo увеличивается эффективность процесса при длительности 80 мкс в 3 раза по сравнению с той же длительностью для сплава Д0, а при добавке 2% – в 6 раз. Повышение частоты

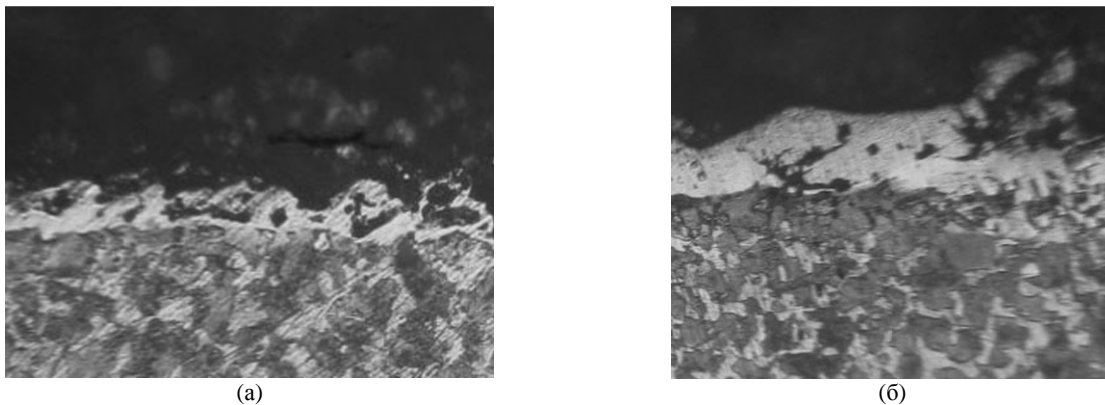


Рис. 2. Характерный вид микроструктуры ЛС, полученного после ЭИЛ стали 45 материалом на основе карбида титана Д2 при длительности (700 \times): (а) 20 мкс; (б) 80 мкс.

следования импульсов с 20 до 80 мкс во всех случаях увеличивает массоперенос и эффективность процесса ЭИЛ.

Результаты влияния ДТК на характеристики безвольфрамовых покрытий приведены в табл. 4. Металлографический анализ микроструктуры ЛС, полученных ЭИЛ электродами TiC-Ni-Mo-ДТК, показал, что повышение содержания ДТК до 2% несколько снижает твердость и толщину слоя при длительности импульсов 20 мкс, однако наличие концентрата в сплаве способствует улучшению характеристик формируемого слоя (рис. 2). Большой плотностью нанесенного слоя обладают образцы, легированные сплавами Д2 и Д4, микротвердость ЛС наибольшая у сплава Д2 при длительности импульсов 80 мкс. Белый слой (БС) представляет собой аустенит, насыщенный дисперсными карбидами Ti, Cr, Mo, Fe. Под этим слоем находится зона термического влияния (ЗТВ), являющаяся зоной отпуска (твердость ЗТВ ниже твердости основы). Предполагается, что БС образуется из жидкой фазы путем перемешивания с основой и взаимопроницающей диффузии.

С повышением содержания ДТК в материале электрода увеличивается содержание кремния и бора. Кремний вызывает охрупчивание, образование оксидов; бор, будучи поверхностно активным элементом, располагается в пограничных областях, затрудняя диффузию углерода и способствуя образованию интерметаллидов.

Введение ДТК в сплавы способствует улучшению характеристик ЛС. Коэффициент упрочнения K представлен в табл. 4. Видно, что наибольший эффект упрочнения достигнут при ЭИЛ сплавами Д2 и Д4 на максимальной длительности электрических импульсов.

Свойства ЛС определяются фазовым составом покрытий, который отличается от состава материала электрода. По данным рентгенофазового анализа, покрытия, кроме основной фазы TiC, содержат фазу FeNi. Фазовый анализ покрытий уточнялся с помощью просвечивающей элек-

тронной микроскопии. На поверхности катода обнаружены интерметаллиды Ni-Mo-Fe, Fe₃₆Mo₁₀, Ni₃Ti₂Si, Ni₄Si₇Ti₄ и др. Образование интерметаллидов с участием никеля, молибдена и железа является следствием микрометаллургических процессов, протекающих на катоде в результате перемешивания и химического взаимодействия компонентов легирующего сплава с материалом катода. Электронная дифракция показала, что в покрытии, полученном электродом с 2% ДТК, появляются бориды титана различной стехиометрии – TiB₂ Ti₂B₅. Кроме основной фазы TiC появляются фазы Ni₃Ti и SiC (рис. 3).

Параметры качества поверхностного слоя взаимосвязаны с эксплуатационными свойствами. С увеличением высотных параметров шероховатости (R_a , R_z , R_{max} , R_p) возрастает коэффициент трения, а при увеличении t_p и S_m , наоборот, снижается. Износостойкость поверхности повышается с увеличением параметра t_p и с уменьшением R_p . Контактная жесткость зависит от параметров t_p и S_m [10].

Как видно из рис. 4, 5 и табл. 5, шероховатость покрытий возрастает с увеличением длительности импульса. Возрастание шероховатости поверхности объясняется тем, что при увеличении длительности импульса увеличивается энергия разряда и при одновременном механическом воздействии и высокой скорости охлаждения происходит более интенсивное перемешивание материалов анода и катода. Установили, что добавка ДТК в электродный материал существенно влияет на характеристики шероховатости поверхности. При увеличении ДТК до 1–2% (Д2, Д4) увеличивается процентное содержание жидкофазной составляющей продуктов эрозии в сравнении со сплавом Д0, а также возрастает количество сферических частиц с увеличением длительности импульсов с 20 до 80 мкс, что способствует улучшению условий формирования ЛС, приводящих к уменьшению шероховатости.

Влияние формы неровностей на эксплуатационные показатели качества детали параметром R_a



Рис. 3. Электронная дифрактограмма ЛС, полученного электродом Д4: (а) Ti_2B_5 ; (б) SiC.

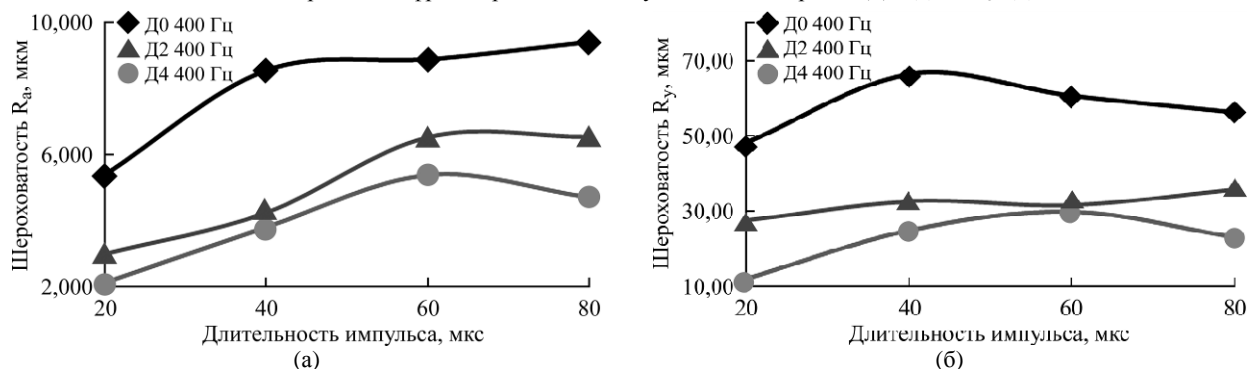


Рис. 4. Зависимость параметров R_a (а) и R_y (б) от длительности импульса.

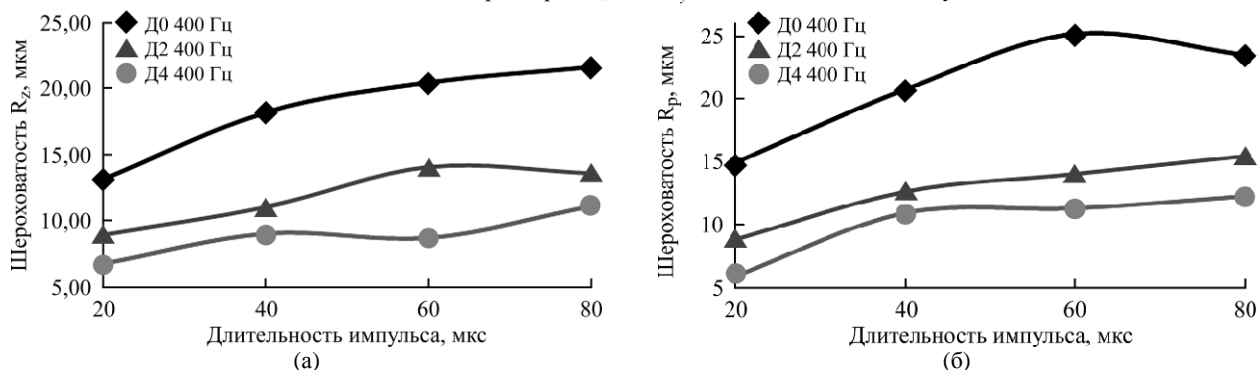


Рис. 5. Зависимость параметров R_z (а) и R_p (б) от длительности импульса.

Таблица 5. Параметры микрогеометрии поверхности

Образец	R_a , мкм	R_z , мкм	R_y , мкм	R_p , мкм	S_m , мкм	S_k
Д0 400 Гц 20 мкс	5,382	13,150	48,040	14,970	0,222	0,245
Д0 400 Гц 40 мкс	8,556	18,280	66,510	20,760	0,222	-0,637
Д0 400 Гц 60 мкс	8,900	20,490	60,880	25,180	0,222	0,888
Д0 400 Гц 80 мкс	9,435	21,690	56,310	23,540	0,235	-0,154
Д2 400 Гц 20 мкс	2,981	9,005	27,340	8,895	0,160	0,354
Д2 400 Гц 40 мкс	4,232	11,060	32,590	12,680	0,174	0,342
Д2 400 Гц 60 мкс	6,534	14,090	31,430	14,090	0,266	-0,885
Д2 400 Гц 80 мкс	6,546	13,620	35,840	15,460	0,235	-0,047
Д4 400 Гц 20 мкс	2,111	6,813	11,640	6,013	0,126	0,230
Д4 400 Гц 40 мкс	3,794	9,039	24,840	10,980	0,200	0,024
Д4 400 Гц 60 мкс	5,386	8,720	29,870	11,350	0,343	-0,764
Д4 400 Гц 80 мкс	4,715	11,170	23,100	12,330	0,235	0,163

однозначно оценить нельзя, так как при различных формах неровностей значения R_a могут быть одинаковыми. Для лучшей оценки свойств шероховатости необходимо знать ее высотные, шаговые параметры и параметры формы кривой t_p . Износостойкость, контактная жесткость и другие

эксплуатационные свойства связаны с фактической площадью их контакта. Из анализа кривых Аббота, приведенных на рис. 6, видно, что при увеличении ДТК до 1–2% происходит возрастание средней относительной опорной длины профиля на разных уровнях. В связи с ростом пара-

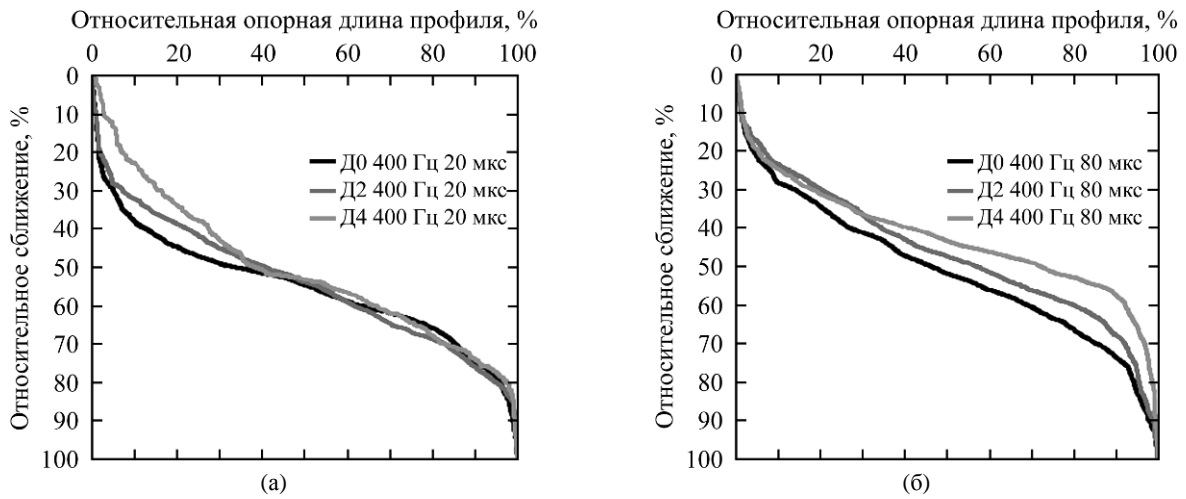


Рис. 6. Кривая Аббота: (а) с длительностью импульсов 20 мкс; (б) с длительностью импульсов 80 мкс; 400 – частота следования электрических импульсов в Гц.

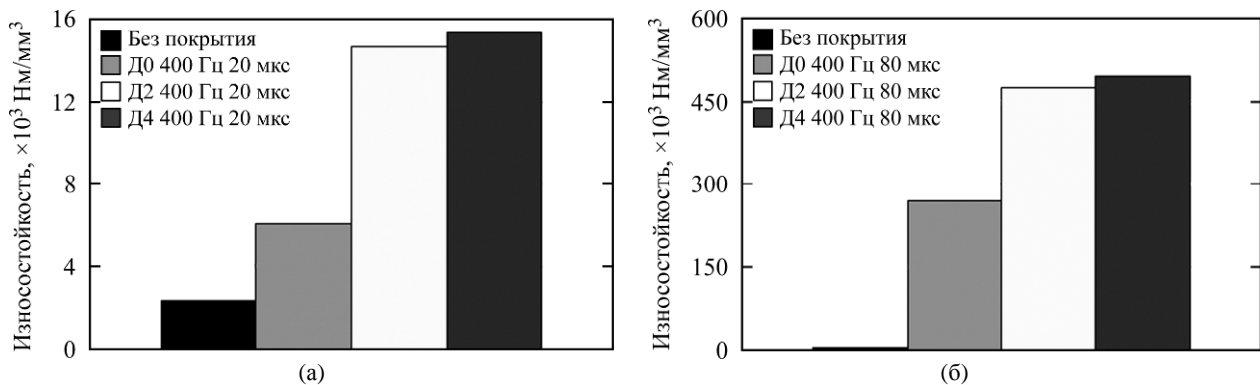


Рис. 7. Износостойкость ЛС на стали 45 с покрытиями из сплавов Д0 и Д2, Д4 с добавкой датолитового концентрата: (а) с длительностью импульсов 20 мкс; (б) с длительностью импульсов 80 мкс; 400 – частота следования электрических импульсов в Гц.

метра t_p отмечается расширение площади фактического контакта, способствующее повышению контактной жесткости.

Проанализировав данные по асимметрии профиля поверхности покрытий (табл. 5), получили как положительные, так и отрицательные значения. При этом обнаружены выступы большой высоты (рис. 5б), что может послужить прорыву смазочной пленки и непосредственному контакту металлов. Поэтому перед эксплуатацией полученных покрытий необходимо провести процесс приработки для уменьшения значений шероховатости, так как выступы приработанной поверхности имеют значительно меньшую кривизну в вершинах, чем выступы неприработанной поверхности, а впадины профиля могут служить карманами для смазочного масла.

Исследования ЛС на микроабразивный износ приведены на рис. 7. Видно, что наилучшей износостойкостью обладает покрытие с 2% добавкой, полученное при частоте следования импульсов 400 Гц и длительности 80 мкс. Полученные данные при исследовании ЛС на микроабразивный износ хорошо коррелируют с данными о шероховатости поверхности. Параметры микроабразивного износа при длительности

импульсов 80 мкс в 14 раз выше, чем при длительности 20 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение процесса формирования ЛС на стали 45 с помощью механизированного ЭИЛ с использованием электродов из TiC с Ni-Mo добавкой позволило установить, что при увеличении длительности импульса повышается шероховатость поверхности покрытия. Введение в состав электродного материала 1–2 масс.% добавки борсодержащего минерального сырья (датолитового концентрата) уменьшает шероховатость поверхности ЛС.

Таким образом, созданные безвольфрамовые композиционные ЭМ на основе карбида титана с никель-молибденовой связкой и добавкой борсодержащего минерального сырья (датолитового концентрата) позволяют получать поверхностные слои на стали 45 высокой микротвердости (10,53–13,85 ГПа), повышенной износостойкости (в сотни раз по сравнению со сталью 45). Представляется перспективным использование технологии СВС-экструзии для производства электродных материалов для ЭИЛ. Также перспективно использование в качестве добавки в элект-

тродный материал датолитового концентрата, который присутствует в нем в виде стеклофазы, повышающей триботехнические характеристики покрытий.

Авторы благодарят сотрудников Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН за помощь в проведении и обсуждении результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровая обработка токопроводящих материалов*. М.: Изд. АН СССР, 1968. 182 с.
2. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца. 1985. 196 с.
3. Верхотуров А.Д., Парамонов А.М., Бондарь В.Т. *Порошковая металлургия*. 1980, **7**(211), 90–94.
4. Михайлов В.В., Гитлевич А.Е., Верхотуров А.Д., Михайлюк А.И., Беляков А.В., Коневцов Л.А. *ЭОМ*. 2013, **49**(5), 21–44.
5. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. *Новые электродные материалы для электроискрового легирования*. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.
6. Шевелева Т.А., Верхотуров А.Д., Николенко С.В. и др. Влияние добавок датолитового концентрата в электродные материалы TiC-Ni-Mo на свойства поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования. *ЭОМ*. 1991, (1), 26–30.
7. Nikolenko S.V., Suy N.A., Pugachevskii M.A., Metlitskaya L.P. *Russian Engineering Research*. 2013, **33**(5), 258–264.
8. Ковальченко М.С., Паустовский А.В., Кириленко С.Н. и др. *Порошковая металлургия*. 1984, (6), 47–50.
9. Подлесов В.В., Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Котов Р.Н. *ЭОМ*. 1995, (3), 9–12.
10. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Сую Н.А. Создание и исследование электродов на основе карбидов вольфрама и титана для механизированного электроискрового легирования. *ЭОМ*. 2015, **51**(1), 38–44.
11. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. *Метрология, стандартизация, сертификация*. М: Логос, 2003. 596 с.
12. Сую Н.А., Николенко С.В. *Программа генерации микросекундных импульсов для установки электроискрового легирования* [Электронный ресурс]. М.: Ф «ВНТИЦ», 2011. Рег. №2011611649. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
13. Намитоков К.К. *Электроэрозионные явления*. М.: Энергия, 1978. 456 с.
14. Kusano Y., Van Acker Y., Hutchings I.M. *Surf Coat Tech*. 2004, **183**(2–3), 312–327.

Поступила 30.04.15

После доработки 04.09.15

Summary

The work is devoted to the study of the influence of parameters of the electric-discharge and electrode materials for the electrospark alloying using boron-containing additives of mineral raw materials on the parameters of micro-geometry and microabrasive wear surface coatings obtained by electrospark alloying. It is found that the longer the electric-discharge duration (from 20 ms to 80 ms), the higher the surface roughness. Injection of 1–2% raw boron improves the physic-chemical properties of the alloyed layer, reduces the roughness, and increases the wear resistance.

Keywords: electrospark alloying, electrode materials, titanium carbide, datolite concentrate, roughness, wear resistance.