

Ю.И. Мулин, Д.В. Ярков

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

Введение

Механизация процесса электроискрового легирования (ЭИЛ) позволяет повысить производительность и качество покрытий, расширить технологические возможности этого уникального способа. Вопросам механизации и автоматизации ЭИЛ посвящено значительное количество работ, в которых рассматриваются различные аспекты обработки, включая выбор кинематических и электрических схем, обоснование траекторий движения электродов, требования для обеспечения большей эффективности процесса и некоторые закономерности формирования упрочненных покрытий [1–5]. Однако слабо отражены взаимосвязь механических и энергетических параметров процесса, зависимость функциональных характеристик покрытий от особенностей контактного взаимодействия электродов и используемых материалов.

Для образования износостойких покрытий традиционно применяются материалы из твердых сплавов, например ВК8 и Т15К6. Однако высокая эрозионная стойкость, низкий коэффициент массопереноса, небольшая толщина (менее 0,05 мм) и хрупкость образуемых покрытий, а также высокая стоимость ограничивают использование вышеуказанных материалов.

Целью работы является установление взаимосвязи энергетических и механических параметров ЭИЛ при безвибрационном контактном взаимодействии электродов, а также исследование влияния состава, структуры материалов электродов на образование износостойких покрытий.

Используемые материалы и методика эксперимента

В качестве катода использовали технологические образцы – детали из стали 45 (ГОСТ 1050-74) диаметром 15 мм, с шероховатостью не более $R_a = 1,6$ мкм. Анодом служили электроды $\varnothing 3$ мм из коррозионно- и жаростойкой стали 07Х19Н11М3Г2Ф, используемые в сварочном производстве и обеспечивающие образование покрытий толщиной до 0,25 мм [6], а также из твердого сплава ВК8 и Си.

При исследовании в атмосфере воздуха использовали: разработанную в институте механизированную установку для электроискрового легирования мод. ИМ101 с одноэлектродной головкой, установленной на токарно-винторезном станке мод. 1К62 [7], прибор для определения среднего количества состоявшихся искровых разрядов, цифровой мультиметр М890G для точного измерения частоты следования импульсов. Для охлаждения электрода применяли воздух под давлением до 4 атм. Частота вращения детали, установленной в трехкулачковый патрон шпинделя станка, постоянная – 12,5 об/мин, частота вращения одноэлектродной головки – 1500 об/мин.

Электрические параметры установки мод. ИМ101: емкость накопительных конденсаторов – 20 – 340 мкФ, частота следования импульсов искровых разрядов – 100 – 1200 Гц, напряжение на разрядных конденсаторах в зависимости от режимов – 58, 78, 92 В, максимальная потребляемая мощность – 1,5 кВт.

При исследовании кинетики массопереноса изменяемым параметром была суммарная величина энергии искровых разрядов Q в случае легирования образца площадью 1 см², значение которой определено по средней величине энергии одного искрового разряда W_u [8]. Значения энергии искрового разряда рассчитаны по вольтамперным осциллограммам, полученным с помощью осциллографа мод. С8-17 по методике [9] непосредственно на межэлектродном промежутке. Численно

суммарная величина энергии искровых разрядов рассчитывалась следующим образом:

$$Q = W_u \cdot N_u \cdot t = W_u \cdot (60 f_u \cdot K_u) \cdot t, \quad (1)$$

где N_u – среднее количество искровых разрядов за 1 мин; t – время легирования 1 см² поверхности; f_u – частота следования искровых разрядов; $K_u = N_u/f_u$ – коэффициент, определяющий вероятность прохождения искрового разряда.

При использовании весов ВЛР-200 и методики [10] определяли величины удельной эрозии анода Δ^a и удельного привеса катода Δ^k через каждую 1 мин ЭИЛ и по их значениям рассчитывали суммарную эрозию анода $\Sigma\Delta^a$ и суммарный привес катода $\Sigma\Delta^k$. Коэффициент переноса материала рассчитывали по формуле $K = \Delta^k/\Delta^a$ при $t = \text{const}$ для каждого электродного материала; Q_x – суммарную энергию искровых разрядов, которой соответствует первое отрицательное значение Δ^k или максимальное значение $\Sigma\Delta^k$ (порог хрупкого разрушения измененного поверхностного слоя (ИПС)), определяли по зависимости суммарного привеса катода [11].

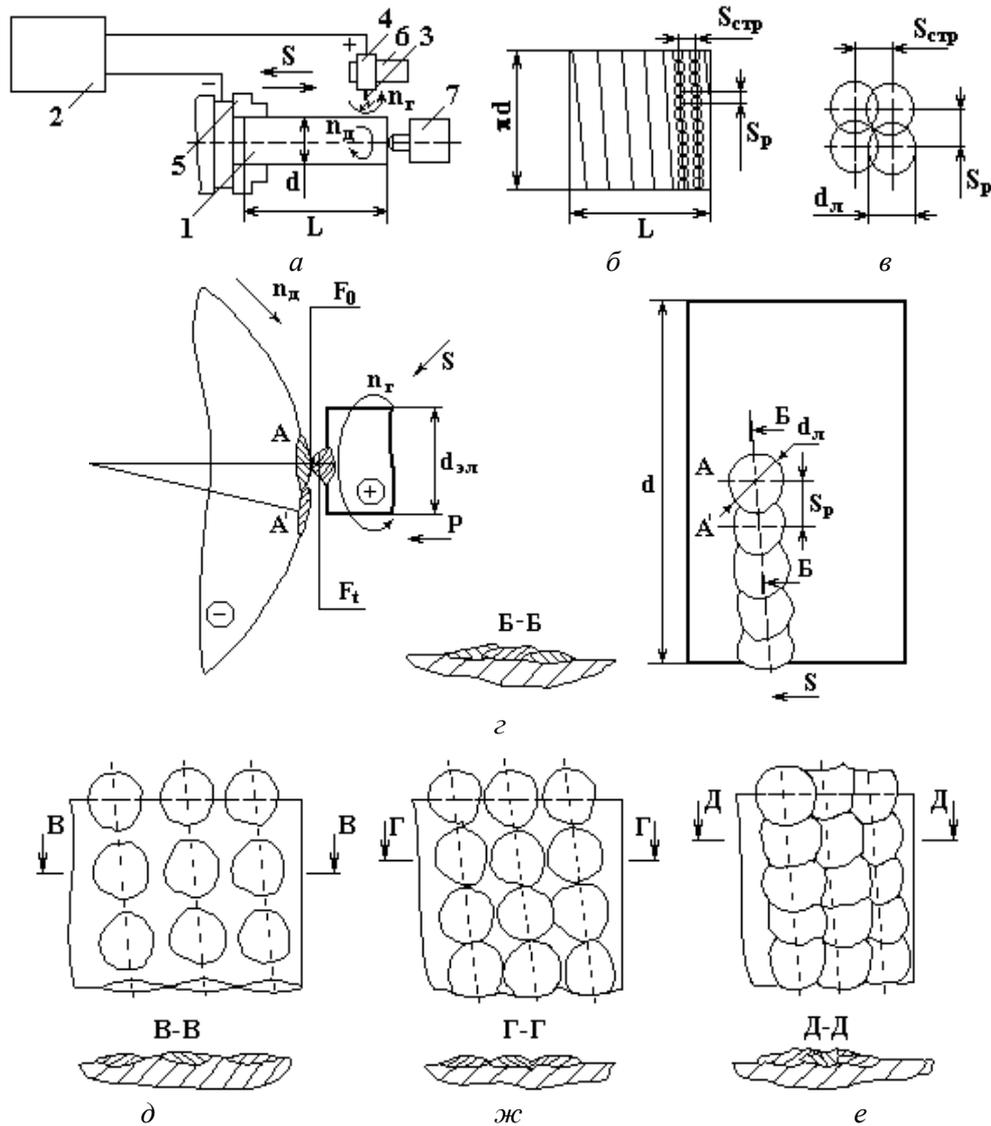


Рис. 1. Формирование ИПС и схема контактного взаимодействия электродов при механизированном ЭИЛ с использованием одноэлектродной вращающейся головки: а – схема механизированного ЭИЛ, 1 – обрабатываемая деталь, 2 – генератор импульсов электрического тока, 3 – анод, 4 – одноэлектродная головка, 5 – устройство для закрепления деталей (патрон), б – блок управления движением одноэлектродной головки, 7 – задний центр); б – развертка поверхности детали; в – схема расположения лунок; г – начало процесса формирования ИПС P – усилие прижатия электрода-инструмента, F_0 – сечение мостика в месте контакта электродов, F_1 – сечение мостика с наибольшей температурой; д – развертка формирования ИПС при $S_{стр} > d_стр$; е – развертка формирования ИПС при $S_{стр} = d_стр$; ж – развертка формирования ИПС при $S_{стр} \leq 0,71 d_стр$

Микротвердость поверхности измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3, металлографические исследования поверхностных слоев выполняли на микроскопе МИМ-10. Шероховатость поверхности измеряли профилографом мод. 296. Сравнительные испытания на износостойкость выполняли в условиях трения без смазки на машине трения МТ-22П по схеме вал–колодка в соответствии с ГОСТ 23.222-84. Удельная нагрузка на образцы составляла 100 Н. Повторяемость экспериментов равна трем. В качестве контртела использовались кольца из закаленной стали 45 (HRC 50 – 56). Скорость скольжения по контртелу составляла 0,25 м/с. Базой испытаний принят путь трения, равный 20 км. Износ образцов измеряли через каждый 1 км пути трения. Износостойкость слоя определяли гравиметрическим методом.

Равномерность расположения электроискровых лунок на поверхности детали определяется постоянным значением коэффициента перекрытия $K_{пер}$ (отношение шага разрядов $S_{стр}(S_p)$ к диаметру лунки d_l), значение которого по строке S_p в направлении вращения детали и поперек строк $S_{стр}$ – в направлении продольной подачи должно быть одинаковым (см. рис.1) $K_{пер} = S_{стр}/d_l = S_p/d_l$ [12].

Это позволяет формировать поверхность с регулярным расположением лунок меньшей шероховатостью и высокой сплошности для принятого $K_{пер}$. Следовательно, $S_{стр}$ определяется продольной подачей S одноэлектродной головки (рис.1, а), а S_p – частотой следования искровых разрядов f_u . Учитывая равенство $S_{стр} = S_p$, возможные изменения диаметра обрабатываемой детали d и частоты ее вращения n_d , для обеспечения равномерности расположения лунок на обрабатываемой поверхности установлена следующая зависимость частоты следования искровых разрядов:

$$f_u = \frac{n_d \pi d}{60 S} \quad (\text{Гц}), \quad (2)$$

где n_d – частота вращения детали – шпинделя станка, мин^{-1} ; S – продольная подача одноэлектродной головки на оборот шпинделя, мм; d – диаметр детали, мм.

Для улучшения качества легируемого слоя и увеличения толщины покрытий частоту следования искровых разрядов необходимо выбирать кратной, рассчитанной при постоянных других механических параметрах процесса и принятом диаметре детали. Равномерность образования покрытия на детали обеспечивается с учетом не только одного искрового разряда, а двух и более последовательных разрядов, приходящихся на участок поверхности, занимаемой одной эрозионной лункой.

Для емкости накопительных конденсаторов 100 мкФ ($d_l \approx 0,14$ мм) расчетным путем и экспериментально определены продольная подача одноэлектродной головки $S = 0,097$ мм/об и частота следования искровых разрядов $f_u = 100, 300$ и 500 Гц. Указанные режимы обработки обеспечивают формирование ИПС наибольшей толщины в соответствии с разверткой рис.1, ж.

При механизированном легировании с использованием одноэлектродной головки инициирование низковольтных искровых разрядов обусловлено постоянным контактным взаимодействием электродов, в результате которого происходят взрывообразное расплавление мостика, образование канала сквозной проводимости, эрозия материала анода и его перенос на катод [13]. Схема контактного взаимодействия электродов, образования ИПС и микрогеометрии поверхности приведена на рис. 1, з – ж.

Результаты и обсуждение

Зависимость массопереноса при механизированном процессе ЭИЛ от величин суммарной энергии Q и частоты следования искровых разрядов f_u с обеспечением перекрытия и равномерности расположения лунок (рис. 2) показывает, что с повышением f_u максимальное значение суммарного привеса катода $\Sigma \Delta_m^k$ значительно увеличивается от 31 мг/см^2 при $f_u = 100$ Гц до 90 мг/см^2 при $f_u = 500$ Гц для материала 07X19N11M3Г2Ф. Суммарная энергия искровых разрядов, соответствующая порогу хрупкого разрушения, также увеличивается от $Q_{x1} = 13,8$ до $Q_{x3} = 18,8 \text{ кДж/см}^2$. Полученные результаты можно объяснить эффектом разогрева электродного материала до определенной температуры, при которой массоперенос происходит в основном за счет эрозии материала в жидкой фазе. Для электродных материалов меди и сплава ВК8 при наиболее эффективной частоте следования искровых разрядов $f_u = 500$ Гц получены значения суммарного привеса катода соответственно $\Sigma \Delta_m^k = 17,1; 11,2 \text{ мг/см}^2$ при $Q_{xi} = 12,8; 13,8 \text{ кДж/см}^2$.

На коэффициент массопереноса при ЭИЛ материалом 07X19N11M3Г2Ф влияют частота следования искровых разрядов f_u и продольная подача одноэлектродной головки S (см. рис. 3). При увеличении f_u K возрастает от 0,52 до 0,81. При меньших значениях f_u массоперенос материала осуществляется при повышенном содержании твердой фазы в продуктах эрозии, которые плохо закрепляются на поверхности подложки и частично удаляются при повышении S за счет электромеханического сглаживания (эффекта Аскинази) [14]. При уменьшении S переносимый легирующий материал

в частично твердой фазе подвергается повторному воздействию искровых разрядов и «размазывается» по поверхности катода за счет вышеуказанного эффекта, коэффициент массопереноса увеличивается.

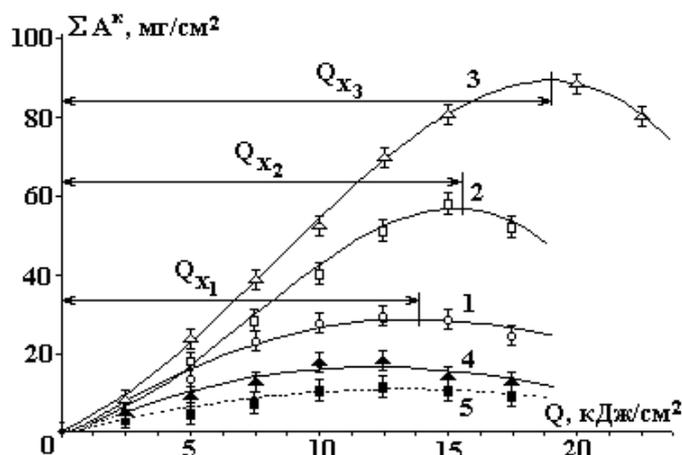


Рис. 2. Зависимость изменения суммарного привеса катода ΣA^k от величин энергии Q и частоты (f_u , Гц: 1 – 100; 2 – 300; 3 – 500) при легировании материалом 07X19H11M3Г2Ф на установке ИМ101 $C=100$ мкФ и $f_u = 500$ Гц (4 и 5) при легировании Си и ВК8, материал подложки – сталь 45

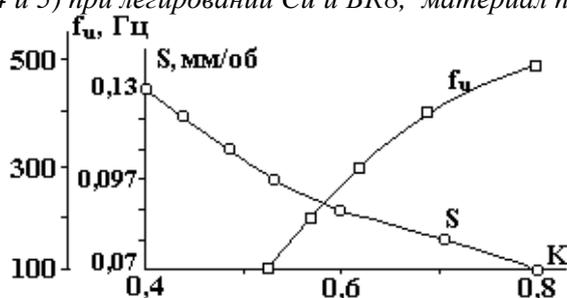


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопереноса при образовании первого слоя электродным материалом 07X19H11M3Г2Ф от технологических параметров механизированного ЭИЛ: f_u , S при легировании на установке ИМ101, материал подложки – сталь 45

Численные значения параметров покрытий, образованных при механизированном ЭИЛ, приведенные в таблице, показывают, что толщина образуемого покрытия на подложке из стали 45 электродным материалом 07X19H11M3Г2Ф в 2,7 – 3,2 раза больше, чем при применении материалов электродов из ВК8 и Си. При небольшом увеличении шероховатости поверхности от $R_a = 1,6$ до 3,5 мкм при использовании этого электродного материала микротвердость повышается от 3,7 до 5,9 ГПа.

Микроструктура покрытий ЭИЛ электродным материалом 07X19H11M3Г2Ф (рис. 4) показывает высокую сплошность и равномерность при значительной толщине.

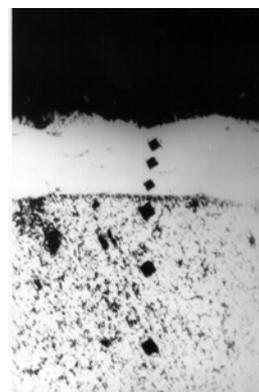


Рис. 4. Микроструктура покрытий ЭИЛ электродным материалом 07X19H11M3Г2Ф на подложке из стали 45 ГОСТ 1050-74 в состоянии поставки. $\times 125$

Зависимости величин износа поверхностей, образованных при ЭИЛ покрытий, от пути трения L для значений суммарной величины энергии искровых разрядов $Q = 3, 10, 17$ кДж/см² при частоте следования импульсов $f_u = 500$ Гц приведены на рис.5. Для материалов электродов 07X19H11M3Г2Ф, ВК8, Си величина износа U на пути трения 20 км составляет для $Q = 3$ кДж/см² – 91, 70, 170 г/м², для $Q = 10$ кДж/см² – 78, 50, 117 г/м², для $Q = 17$ кДж/см² – 81, 90, 180 г/см² соответственно. На рис.5,а для сравнения приведены зависимости износа поверхности стали 45 без покрытия.

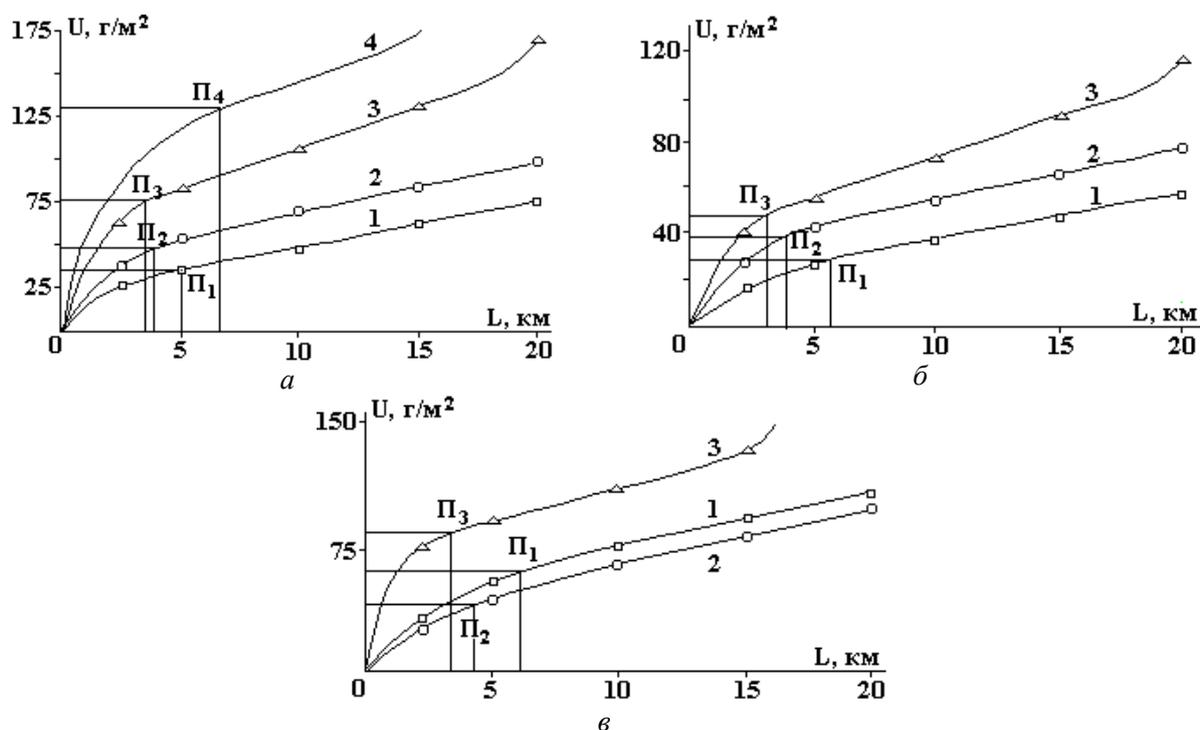


Рис. 5. Зависимости величин износа поверхностей покрытий от путей трения L при следующих значениях суммарной величины энергии искровых разрядов Q , кДж/см²: а – 3, б – 10, в – 17 для материалов электродов: 1 – ВК8, 2 – 07Х19Н11МЗГ2Ф, 3 – Си, 4 – Сталь 45 без покрытия; Π_i – окончание процесса приработки

При $Q = 17$ кДж/см² наименьший износ имеют покрытия, образованные электродным материалом 07Х19Н11МЗГ2Ф, а покрытия, образованные электродами ВК8 и Си, исчерпали свои антифрикционные свойства. Это связано с тем, что Q_x для этого материала равны 18,8 кДж/см² (см. таблицу), а для твердого сплава ВК8 и Си составляют соответственно 12,8 и 13,8 кДж/см². Структура покрытий, сформированных при больших Q_x , превышающих порог хрупкого разрушения, имеет предельное значение плотности дислокаций, большее количество микротрещин и других дефектов [15].

Численные значения параметров ИПС, образуемых при механизированном ЭИЛ на подложках из стали 45

Материал анода	Технологические параметры		Параметры ИПС			
	Q_x , кДж/см ²	$f_{ин}$, Гц	толщина Δh , мкм	микротвер- дость, ГПа	шерохова- тость, R_a , мкм	повышение из- носостойкости, %
07Х19Н11МЗГ2Ф	13,8	100	110	5,9	3,0	140
07Х19Н11МЗГ2Ф	15,5	300	140	5,8	3,2	160
07Х19Н11МЗГ2Ф	18,8	500	190	5,9	3,5	170
ВК8	13,8	500	60	10,5	2,2	220
Си	12,8	500	70	2,5	2,8	130

Приведенные на рис. 5 зависимости также позволяют определить значение приработки для исследуемых материалов Π_i . Период приработки $\Pi_i = 3; 4$ км для электродных материалов Си и 07Х19Н11МЗГ2Ф соответственно (рис. 5, б) имеет наименьшее значение при формировании ИПС с суммарной величиной энергии искровых разрядов $Q = 10$ кДж/см². Период приработки для ИПС, образованного ВК8 в зависимости от Q , $\Pi_2 = 5; 5,2; 6$ км. Триботехнические показатели лучше для покрытий, образованных электродным материалом 07Х19Н11МЗГ2Ф и ВК8.

Выводы

1. Предложена схема контактного взаимодействия электродов при механизированном ЭИЛ и определена взаимосвязь механических параметров процесса и частоты следования искровых разрядов для обеспечения равномерности расположения электроискровых лунок. Использование зависимости позволяет повысить сплошность и равномерность толщины покрытий.

2. Закономерности массопереноса в зависимости от суммарной величины энергии и частоты следования искровых разрядов в условиях механизированного ЭИЛ являются не линейными и не аддитивными. С повышением частоты следования искровых разрядов f_u , значения суммарного привеса катода $\Sigma\Delta^k$ и суммарной энергии искровых разрядов Q_x , соответствующие порогу хрупкого разрушения ИПС, увеличиваются.

3. В соответствии с полученными зависимостями процесс ЭИЛ рекомендуется проводить при значениях суммарной величины энергии искровых разрядов, не превышающей Q_x (до экстремальной точки).

4. Установлена зависимость коэффициента массопереноса K от технологических параметров процесса. При увеличении частоты следования импульсов f_u и уменьшении подачи S коэффициент массопереноса возрастает.

5. При механизированном ЭИЛ применение электродного материала 07X19N11M3Г2Ф обеспечивает формирование покрытий с высокой сплошностью, равномерностью и толщиной, превышающей в 2,7 – 3,2 раза, эти параметры при использовании материалов электродов из ВК8 и Си.

6. На износостойкость образованных покрытий оказывает влияние значение суммарной величины энергии искровых разрядов. Лучшие триботехнические характеристики в условиях трения без смазки для исследуемых материалов электродов соответствуют величине энергии $Q = 10$ кДж/см².

ЛИТЕРАТУРА

1. Разумов В.П., Еган О.М. Некоторые особенности механизации процесса электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. 1977. № 4. С. 22–24.
2. Галай В.И. Некоторые кинематические особенности механизированного электроискрового легирования сферических поверхностей // Там же. 1980. № 4. С. 72–74.
3. Коваленко С.В., Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Куценко В.С. Исследование влияния механических параметров механизированной установки для ЭИЛ вращающимся торцевым электродом на формирование поверхностного слоя // Там же. 2003. № 3. С. 14–21.
4. Коваль Н.П., Корниенко А.И., Гитлевич А.Е. и др. Механизированное электроискровое легирование деталей с плоскими рабочими поверхностями // Там же. 1981. № 3. С. 77–83.
5. Чжен И.А., Золотов А.А., Потехин К.Ф., Максимов Н.Г. Исследование влияния некоторых переменных факторов на интенсификацию механизированного электроискрового легирования металлических поверхностей // Там же. 1982. № 4. С. 26–29.
6. Ярков Д.В., Масленко А.С., Мулин Ю.И. Модифицирование поверхностного слоя при использовании механизированной установки модели ИМ-101. Принципы и процессы создания неорганических материалов // Тезисы докладов международного симпозиума (Первые Самсоновские чтения). Хабаровск, 1998. С. 117–119.
7. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д. Электроискровое легирование поверхностей инструментов и деталей машин материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток, 1999.
8. Рыбалко А.В., Хамураев В.И. Электрические параметры процесса электроэрозионного легирования // Электронная обработка материалов. 1988. № 6. С. 18–20.
9. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50–56.
10. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1965. № 1. С. 49–53.
11. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М., 1988.
12. Носков Ю.Г. Оптимизация процесса механизированного электроискрового легирования прецизионных деталей приборов: Дис. канд. техн. наук. Л., 1987.
13. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток, 1995.
14. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. М., 1968.
15. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М., 2001.

Поступила 25.02.04

Summary

Interrelationship between mechanical parameters of process and recurrence rate of spark discharges providing thickness evenness and continuousness of coatings has been determined. Influence of composition and structure of electrode materials, mechanical and energy parameters of ESA process on wear resistant of coating under dry friction has been determined.

А.И. Костржицкий, Е.В. Ляпина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ МЕДЬ–ОЛОВО И ИХ АНАЛОГАХ

*Одесская национальная академия пищевых технологий,
ул. Канатная, 112, г. Одесса, 65039, Украина*

Известно [1 – 3], что структура и фазовый состав конденсированных систем, в частности защитных покрытий на стали, в значительной степени определяют их функциональные свойства: коррозионную стойкость, износостойчивость, электропроводность и т. п. В случае многокомпонентных систем [3 – 5] установлена взаимосвязь между составом конденсатов и их электрохимическими характеристиками в некоторых агрессивных средах. Для конденсированных структур экспериментально установлены существенные различия в микроструктуре массивных и конденсированных систем, например, в сплавах на основе железа [3, 6 – 8]. Эти различия с учетом закономерностей роста конденсатов [6, 8] позволяют объяснить многие специфические свойства защитных покрытий: пористость, электрохимическое поведение и пр. [3, 7].

В настоящей работе изучены закономерности формирования структуры и фазового состава в сплавах Cu-Sn, Cu-Sn-Ni и Cu-Sn-Al, коррозионно-электрохимические свойства которых [4, 5] позволили их рекомендовать к использованию в некоторых устройствах электронной техники. В исследованиях использованы как массивные сплавы, так и конденсированные системы. Образцы массивных сплавов получены путем плавления компонентов в тигеле вакуумных камер в атмосфере аргона при давлении порядка 1,33 Па. Конденсированные структуры получены испарением готовых сплавов в вакууме 10^{-2} – 10^{-4} Па с последующей конденсацией на подогреваемые диэлектрические подложки.

Рентгенографический анализ структуры и фазового состава выполнен на дифрактометре ДРОН-1 с использованием медного излучения $\text{Cu } \kappa_{\alpha}$ и никелевого фильтра. Идентификация фаз и расчет межплоскостных расстояний проведены по справочникам рентгеноструктурного анализа. Фазовый состав конденсатов изучен на рентгеновском микроанализаторе MS-46 методом локального рентгеноспектрального анализа. Микроструктура и рельеф поверхности конденсированных систем изучены с помощью растрового электронного микроскопа KWIKSCAN-100 при увеличении до 5000.

В ходе экспериментов установлено, что фазовый состав массивных сплавов (исходных навесок) и конденсированных систем в принципе идентичен. Малолегированные сплавы Cu-Sn в массивном состоянии являются однофазными в пределах чувствительности использованного метода. Структура свеженанесенных пленок малолегированных сплавов однородная и мелкозернистая. Границы зерен не выделяются. При содержании Sn порядка 10% (по массе) фиксируется твердый раствор олова в меди. В конденсатах, полученных полным испарением навески данного состава, обнаружены соединения CuSn , а также следы оксидов Cu_2O и CuO (см. таблицу). Формирование последних мы связываем со спецификой процесса осаждения в атмосфере остаточных газов, взаимодействием испаренных веществ (в частности меди) с кислородом остаточных газов и носит случайный характер. Формирование оксидов в пленках фиксируется не во всех опытах. Такое своеобразное “легирование” конденсата Cu-Sn оказывает влияние на стабильность конденсированных структур при длительном хранении и умеренном отжиге. Гетерофазность конденсированных структур и особенно высокая