

1980.- №6.- С.28. 10. Патент США № 4313771 Заявлен 29.02.80., Опубл. Б.И. в СССР и за рубежом.- 1982.- Вып.65.- №11. 11. Износостойкость образцов из стали и чугуна, упрочненных лучом лазера и обычными методами / П.П. Голубев, П.С. Гурченко, М.В. Кабакович, А.И. Корунчиков // Автомобильная промышленность.- 1982.- №11.- С.27. 12. Андрияхин В.М., Чеканова Н.Т. О некоторых видах покрытий, используемых при обработке металлов излучением лазера // Поверхность.- 1983.- №2.- С.145.

УДК 537.523

Г. В. Марков, А. П. Ралько

СКОРОСТЬ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ВАКУУМНЫМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

*Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

В последние два десятилетия благодаря своим особенностям и достоинствам широкое распространение нашел вакуумный электродуговой метод (метод КИБ) нанесения покрытий различного функционального назначения [1]. Основным инструментом нанесения покрытия в данном методе служит вакуумная дуга, возбуждаемая (зажигаемая) в вакууме между металлическими катодом и анодом (обычно это стенки вакуумной камеры), когда между ними прикладывается некоторая разность потенциалов U . При этом источником потока положительных ионов металла катода, формирующих покрытие, является катодное пятно вакуумной дуги, хаотически перемещающееся по поверхности катода.

Одной из важнейших характеристик методов нанесения является скорость нанесения dh/dt . Для вакуумного электродугового метода скорость нанесения покрытия определяется коэффициентом ионной эрозии μ . Коэффициент ионной эрозии μ есть масса металла катода, безвозвратно теряемая катодом из единичного катодного пятна в виде атомов и положительных ионов плазмы вакуумной дуги металла катода, при прохождении через вакуумную дугу электрического заряда в 1 Кл. При этом в коэффициенте μ не учитывается масса, теряемая катодом в виде микрокапель. Тогда можно записать, что при горении вакуумной дуги масса dm , теряемая катодом за время dt , равно

$$dm = \mu I_d dt, \quad (1)$$

где I_d – ток вакуумной дуги.

Отсюда следует, что скорость нанесения на подложку, отстоящую от катода на расстоянии R , можно оценить по следующей формуле

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(\alpha - S) \mu I_d}{2\pi \rho R^2}, \quad (2)$$

где α , S — соответственно коэффициенты конденсации и распыления, зависящие от энергии ионов, конденсирующихся на подложке; ρ — плотность материала покрытия.

Чтобы найти формулы с помощью которых можно было бы оценить значения μ металлов и сплавов, необходимо рассмотреть процессы, происходящие в катодном пятне вакуумной дуги. Классическая картина [2-8] физических процессов, имеющих место в катодном пятне, когда между катодом и анодом горит вакуумная дуга, включает в себя испарение с поверхности катода атомов металла, термоавтоэлектронную эмиссию электронов с той же поверхности. Далее происходит разлет атомов и ускорение электронов в электрическом поле U , примыкающем к поверхности катода и где имеет место катодное падение потенциала U_k (для вакуумной дуги характерно, что $U \sim U_k$). При ускорении электронов в электрическом поле U_k на некотором расстоянии от поверхности испарения они начинают эффективно ионизировать испарившиеся атомы металла катода и образуется плазменное облако со степенью ионизации 0,7 – 0,95, состоящее из положительных ионов и электронов. Большая часть положительных ионов [9] под действием поля U_k возвращается на поверхность катода в катодном пятне, создавая там давления, достигающие десятков атмосфер, и разогревая поверхность катода до температур близких к температурам кипения T_k металла. Меньшая часть ионов распространяется в объем вакуумной камеры, приобретая за счет газодинамического ускорения [10] энергии порядка 20 – 120 эВ [3,6,11], что значительно превышает величину U_k [2,6,8]. Из этого следует, что коэффициент ионной эрозии μ определяется той частью ионов, которые распространяются в объем вакуумной камеры.

Чтобы найти выражение с помощью которого можно было бы оценить величину μ , обратимся к упрощенному уравнению теплового баланса катодного пятна:

$$I_i (U_k + \varepsilon_i) dt + r dM_i = r dM, \quad (3)$$

где I_i — ток ионов, возвращающихся на поверхность катода; ε_i — потенциал ионизации атомов металла катода; dM_i — масса ионов металла катода, возвращающихся на катод за время dt ; dM — масса атомов, испаряющихся за время dt с поверхности катода в ка-

тодном пятне. Потерями тепла на нагрев, плавление и излучение из катодного пятна пренебрегли ввиду их малости по сравнению с величиной rdM .

Раскроем некоторые члены уравнения (3), тогда

$$dM = dm + dM_i; \quad (4)$$

$$dI_d = I_i + I_e + I_i^*, \quad (5)$$

где I_e – ток вакуумной дуги, переносимый электронами; I_i^* – ток ионов, распространяющихся в объем вакуумной камеры.

Тогда из (1), (3) – (5) получаем:

$$\mu = \frac{U_k + \varepsilon}{\left(1 + \frac{I_e}{I_i} + \frac{I_i^*}{I_i}\right)}. \quad (6)$$

В выражении (6) величина I_i^*/I_i по оценкам самых различных исследователей [5,8] не превышает значений 0,1 + 0,15 и поэтому ею можно пренебречь. Следовательно, наиболее неопределенными величинами остаются I_e , I_e и U_k . Если по величине катодного падения потенциала U_k имеется достаточно обширный материал [2, 4, 6 – 8], то оценить величины I_e , I_e достаточно трудно. Результаты анализа экспериментальных данных [2, 4, 8] позволяют утверждать, что около 70 %– 90 % количества атомов, испаряемых с поверхности катода в катодном пятне, после их ионизации возвращаются под действием поля U_k на ту же поверхность в виде однозарядных ионов. Поэтому можно без большой ошибки вместо отношения I_e/I_i использовать отношение $n_e v_e / n_a v_a$, где $n_e v_e$, $n_a v_a$ – соответственно количества эмиттируемых электронов и испаряемых атомов с единицы площади катодного пятна в единицу времени. Итак,

$$\mu = \frac{U_k + \varepsilon}{r \left(1 + \frac{n_e v_e}{n_a v_a}\right)}. \quad (7)$$

В (7) отношение $n_e v_e / n_a v_a$ можно оценить, если воспользоваться формулами Ри-

чардсона - Дешмана с учетом эффекта Шоттки [12] для термоавтоэлектронной эмиссии и Герца - Кнудсена [13] для испарения атомов. При этом принимается, что для чистых металлов температура поверхности катода в катодном пятне равна температуре кипения. Величина U_k , как оказывается [14], определяется величиной энергии при которой сечение однократной ударной ионизации электроном атома металла достигает своего максимума. С учетом всего вышеприведенного, были проведены расчеты из результатов которых следует, что для Al отношение $n_e v_e / n_a v_a \sim (5 \div 7)$, Cu - $(2 \div 4)$, Ti - $(15 \div 20)$, Mo - $(100 \div 150)$. Теперь, когда известны значения отношения $n_e v_e / n_a v_a$, можно оценить величину коэффициента ионной эрозии μ . Так для Al $\mu \sim (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ г/Кл, Cu - $(6 \div 8) \cdot 10^{-4}$ г/Кл, Ti - $(7 \div 9) \cdot 10^{-5}$ г/Кл, Mo - $(1 \div 2) \cdot 10^{-5}$ г/Кл. Как видно, получены вполне правдоподобные значения, которые сравнимы с экспериментальными данными, приведенными в работах [2, 4, 7, 8].

Таким образом, приведенная схема расчета позволяет с достаточной для практики точностью оценивать скорость нанесения покрытий вакуумным электродуговым методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек Ж. А., Эйзер Б. А., Марков Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. -Мн: Наука и техника, 1991. -96с.
2. Вакуумные дуги. Под ред. Дж. Лафферти. -М.: Мир, 1982. -429с.
3. Любимов Г. А., Раховский В. И. // Успехи физических наук. -1978. -125. -№4. -С.665-706.
4. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. -М.:Наука, 1970. -536с.
5. Бейлис И. И., Зекцер М. П., Любимов Г. А. // Журнал технической физики. - 1988. - 58. - №10. - С. 1861 - 1870.
6. Handbook of vacuum arc: Science and technology / Edited by R. L. Vohman, D. M. Sanders, P. J. Martin, Park Ridge, New Jersey. 1995. - 825p.
7. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. - М. : Наука, 1968. - 320 с.
8. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. -М.: 2000. -424с.
9. Немчинский В. А. // Журнал технической физики. -1982. -52. -№9. -С.1748-1756.
10. Немчинский В. А. // Журнал технической физики. -1985. -55. -№1. -С.60-71.
11. Мойжес Б. Я., Немчинский В. А. // Журнал технической физики. -1982. -52. -№4. -С.684-693.
12. Савицкий Е. М. и др. Электрические и эмиссионные свойства сплавов. -М.: Наука, 1978. -285с.
13. Ивановский М. Н. и др. Испарение и конденсация металлов. -М.: Наука, 1972. -325с.
14. Марков Г. В. // Инженерно-технический журнал. -2002: -75. -№1. -С.171-173.