

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ УСКОРЕННЫМИ ПОТОКАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

Кузнецов В.Г., Курбанов Т.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

Ключевые слова: вакуумная дуга, катодное пятно, ионы, микрокапли, распыление, конденсация, катод.

Аннотация. Применительно к условиям взаимодействия ускоренных потоков металлической плазмы с металлической поверхностью анализируется влияние температуры катода вакуумно-дугового испарителя, напряжения отрицательного смещения на подложке с учетом конденсации микрокапельной фракции на процесс распыления поверхностного слоя. Получено выражение, позволяющее оценить скорость распыления поверхностного слоя в зависимости от температуры катода. Использование полученных зависимостей позволяет выбрать необходимую длительность процесса ионной очистки с учетом толщины используемого катода.

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES DURING SURFACE TREATMENT WITH ACCELERATED FLOWS OF METAL PLASMA

Kuznetsov V.G., Kurbanov T.F.

Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS, Saint Petersburg

Keywords: vacuum arc, cathode spot, ions, microdroplets, sputtering, condensation, cathode.

Abstract. In relation to the conditions of interaction of accelerated metal plasma flows with a metal surface, the influence of the cathode temperature of the vacuum-arc evaporator, the negative displacement voltage on the substrate, taking into account the condensation of the micro-droplet fraction, on the spraying process of the surface layer is analyzed. An expression is obtained that allows us to estimate the sputtering rate of the surface layer depending on the cathode temperature. Using the obtained dependencies allows you to choose the necessary duration of the ion purification process, taking into account the thickness of the cathode.

Технология вакуумно-дугового нанесения покрытий широко используется применительно к изделиям машиностроения. На процесс взаимодействия потока заряженных частиц с изделием оказывает влияние состав, энергия и плотность плазменного потока, которые, в том числе, зависят и от теплового режима испаряемого материала катода [1, 2], и от величины отрицательного напряжения смещения на изделии. При энергии ионов, превышающей $4H$ (H - теплота сублимации материала подложки), воздействие ионного потока на подложку приводит к выбиванию атомов из ее поверхности в окружающее пространство. Коэффициент распыления, определяемый как отношение числа выбитых атомов к числу ионов, падающих на подложку, является одной из наиболее важных характеристик процесса ионного распыления. Из существующих в настоящее время теорий распыления наиболее общей является линейная каскадная теория Зигмунда. Согласно ей [3] коэффициент распыления S плоской мишени определяется выражением:

$$S = \frac{\alpha S_n(E)}{16\pi^3 a^2 U_0}, \quad (1)$$

где α – функция отношения массы выбитого атома к массе иона (M_2/M_1); $S_n(E)$ – сечение торможения иона ядром; $a = 0,219$ – радиус экранирования, предложенный Андерсенем и Зигмундом для взаимодействия Борна-Мейера между двумя атомами; U_0 – энергия поверхностного барьера, принятая равной теплоте сублимации.

Вид функции S зависит от энергии ионов. Для низких энергий Зигмундом получено:

$$S = \frac{3\alpha\lambda E}{4\pi^2 U_0}, \quad (2)$$

то есть коэффициент распыления пропорционален энергии бомбардирующих ионов и обратно пропорционален теплоте сублимации.

Однако теория не объясняет тот факт, что коэффициент распыления изменяется значительно сильнее в зависимости от природы ионов, чем в зависимости от природы атомов мишени.

При взаимодействии ионного потока с подложкой около 90% кинетической энергии преобразуется в тепловую, что вызывает разогрев поверхности подложки. Результаты работ, посвященных изучению распыления поверхности при ионной бомбардировке, свидетельствуют о том, что повышение температуры поверхности может приводить к трансформации ряда поверхностных явлений и развитию новых, не наблюдаемых при низких температурах.

Положительное влияние ионной обработки обычно связывается с распылением загрязненного поверхностного слоя подложки и внедрением бомбардирующих ионов в материал подложки с образованием переходной области переменного состава – «псевдодиффузионный слой». Отрицательное влияние ионной обработки поверхности подложки из жаропрочных сплавов перед нанесением защитного покрытия связано с развитием рельефа подложки, сопровождающееся изменением концентрации элементов.

В виду того, что продукты эрозии катода неоднородны по своему составу, одновременно с распылением происходит конденсация микрокапельной компоненты на поверхности подложки. Поэтому скорость распыления непосредственно самой подложки уменьшается. Скорость распыления подложки, определяемая на основе результатов ее взвешивания до и после обработки в плазме разряда, рассчитывается по формуле:

$$V_p^u = \frac{\Delta m}{\rho S t}, \quad (3)$$

где Δm – изменение массы подложки; ρ – плотность покрытия; S – площадь подложки; t – время обработки.

Для общей скорости распыления, рассчитанной по формуле (2), можно записать:

$$V_p = V_p^u - V_n, \quad (4)$$

где V_p^u – скорость распыления, определяемая действием ионной компоненты плазменного потока; V_n – скорость конденсации микрокапельной компоненты.

Соотношение между величинами V_p^u и V_n зависит от материала катода и его температуры. Учитывая, что величина V_p^u пропорциональна плотности ионного тока, извлекаемой из плазмы на подложку, то скорость распыления подложки V_p^{ui} при температуре катода T_i можно выразить через скорость распыления V_p^{uj} , производимую действием плазменного потока при температуре катода T_j :

$$V_p^{ui} = \frac{j^i}{j^j} \cdot V_p^{uj}, \quad (5)$$

где j^i – плотность ионного тока на подложку при температуре катода T_i ; j^j – плотность ионного тока на подложку при температуре катода T_j .

На основании (4) и (5) скорость распыления подложки при температуре катода T_i можно выразить через скорость распыления при температуре катода T_j :

$$V_p^i = \frac{j^i}{j^j} (V_p^j + V_n^j) - V_n^i. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) дает возможность определить скорость распыления подложки при произвольной температуре катода на основании экспериментального измерения величин V_p^j , V_n^j , j^j и вида зависимостей $V_n(T)$ и $j(T)$. В связи с тем, что подводимая к катоду мощность в основном отводится в систему охлаждения, можно определить температуру поверхности катода [4].

$$T_k = T_0 + \frac{qL_k}{\lambda} \cdot \left(1 - \nu - \sum_{n=1}^{\infty} A_n - \sin[\mu_n(1-\nu)] \cdot x \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0) \right), \quad (7)$$

где q – плотность теплового потока, L_k – толщина катода, λ – теплопроводность материала, t – момент времени, в который определяется температура, ν – параметр толщины ($\nu = x/L_k$, x – координата точки, в которой определяется температура), $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$; $A_n = (-1)^{n+1} 2/\mu_n^2$.

Исходя из технологических параметров процесса нанесения покрытий, теплофизических констант материалов и размеров используемых катодов было получено численное решение уравнения (7) для чистого металла (T_i) и многокомпонентного сплава (CoCrAlY). Результаты расчета и экспериментальные измерения температуры поверхности титанового катода в зависимости от времени горения вакуумно-дугового разряда представлены на рисунке 1.

Экспериментальные измерения температуры катода выполнены с помощью хромель-алюмелевой термопары, зачеканенной на глубине около 1 мм от рабочей поверхности катода. Как видно из рисунка, теоретический расчет достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На рисунке 2 приведены зависимости скорости микрокапельного потока (кривые 1 и 2) и плотности ионного тока на подложку (кривые 3 и 4) от температуры поверхности катода для двух указанных выше материалов.

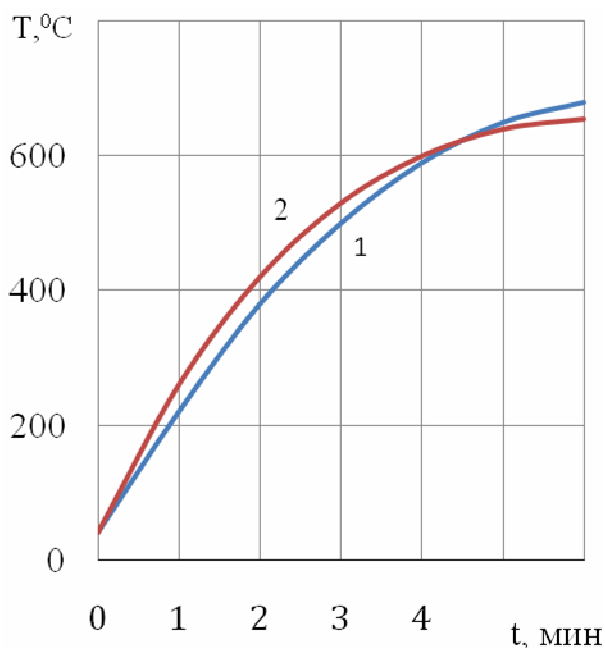


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности катода от времени горения дугового разряда: 1 – расчет, 2 – эксперимент

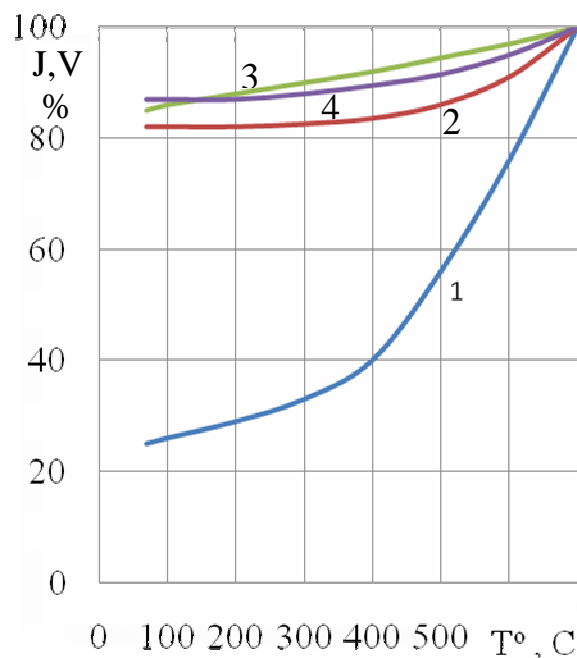


Рис. 2. Зависимость скорости конденсации микрокапель (1 – Ti; 2 – CoCrAlY) и плотности ионного тока на подложку (3 – Ti, 4 – CoCrAlY) от температуры поверхности катода

Для определения влияния температуры катода на количество микрокапельной составляющей в плазменном потоке стеклянные подложки экспонировались в течение 10 сек в потоке плазмы тех же материалов (Ti и CoCrAlY) при температурах поверхности катода, равной 50, 300, 500, 700°C. Анализ фотографий позволил сделать вывод, что увеличение температуры катода приводит к росту доли капельной составляющей в плазменном потоке. Этот результат согласуется с данными работ других исследователей. Полученные результаты свидетельствуют о том, представляется целесообразным нахождение оптимального соотношения между ионным и капельным потоками на обрабатываемую поверхность. Интерполяция полученных зависимостей плотности ионного тока J и скорости конденсации капель V для температурной области 50-700°C, например, для титана дает следующие результаты:

$$J^{Ti}(T) = 6,5 \cdot 10^{-2} + 7,6 \cdot 10^{-6} T + 1,5 \cdot 10^{-8} T^2 \quad (8)$$

$$V^{Ti}(T) = 0,13 + 8,4 \cdot 10^{-4} T + 2,8 \cdot 10^{-6} T^2 + 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \quad (9)$$

Используя выражение (7) для зависимости температуры катода от его толщины и выражения (8) и (9) для скорости распыления подложки в зависимости от толщины катода, можно получить выражение (6), представленное выше.

Таким образом, длительность процесса ионной очистки t , необходимой для распыления слоя поверхности подложки толщиной h , можно определить, разделив h на $V_p(L_k)$, функция которого определяется выражением (6).

Использование полученных зависимостей позволяет выбрать необходимую длительность процесса ионной очистки с учетом толщины используемого катода.

Список литературы

1. Kuznetsov V.G., Kostrin D.K., Valuev V.P. Thermal regime of the cathode in a vacuum-arc discharge during coating deposition // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1281, p. 012044.
2. Аксенов И.И., Брень В.Г., Коновалов И.И., Кудрявцева Е.Е., Падалка В.Г., Сысоев Ю.А., Хороших В.М. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. II. Влияние интегральной температуры катода // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 21, № 4. – С. 646-651.
3. Sigmund P. Theory of sputtering // Phys. Rev. 1969, vol. 184, p. 383.
4. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

Сведения об авторах:

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – д.т.н., заведующий лабораторией модифицирования поверхностей материалов;

Курбанов Тельман Айдабекович – ведущий инженер лаборатории модифицирования поверхностей материалов.