

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПАРЯЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

Кузнецов В.Г.

*Институт проблем машиноведения Российской Академии наук,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: плазма, вакуумная дуга, температура, катод, покрытия, испарение.

Аннотация. Анализируется влияние температуры катода вакуумно-дугового испарителя на структуру и эксплуатационные свойства покрытий. По мере выработки катода может произойти существенное изменение свойств потока плазмы даже при застabilизированных параметрах разряда. Предложено для поддержания температуры катода на заданном уровне изменять ток дугового разряда во времени в процессе испарения катода. Получены математические выражения для расчета временной зависимости тока дугового разряда и расчета эрозии катода во времени.

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF THE EVAPORATED MATERIAL ON THE PLASMA FLOW PARAMETERS AND COATING PROPERTIES

Kuznetsov V.G.

*Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg*

Keywords: plasma, vacuum arc, temperature, cathode, coatings, evaporation.

Abstract. The influence of the cathode temperature of the vacuum arc evaporator on the structure and operational properties of coatings is analyzed. As the cathode thickness decreases, even with stabilized discharge parameters, a significant change in the properties of the plasma flow can occur. It is proposed to change the arc discharge current in time during the cathode evaporation process in order to maintain the cathode temperature at a given level. Mathematical expressions are obtained for calculating the time dependence of the arc discharge current and calculating cathode erosion over time.

Технология вакуумно-дугового нанесения покрытий различного назначения широко используется в машиностроении и других областях. Наиболее распространенной формой вакуумно-дугового разряда, используемой в технологии нанесения покрытий, является дуга с водоохлажденным катодом. При интегрально-холодной поверхности катода привязка разряда к поверхности этого электрода осуществляется в виде катодных пятен, которые являются источниками скоростных струй сильно ионизованной плазмы материала катода. Ионная и нейтральная компоненты плазмы, конденсируясь на подложке, и образуют покрытие. Естественно, что свойства формирующихся покрытий должны зависеть от состава плазмы, в частности, от плотности потока ионизированной компоненты.

В [1] показано, что если катод изготовлен из титана, то при переходе температуры его поверхности через 770К (соответствует температуре рекристаллизационного отжига) резко, более чем в 1,5 раза изменяется ток насыщения ионов, регистрируемый с помощью электростатического зонда.

Эрозия материала катода с течением времени приводит к уменьшению его толщины, что улучшает отвод тепла в систему охлаждения и вызывает снижение температуры эродируемой поверхности. Таким образом, по мере выработки катода может произойти существенное изменение свойств потока плазмы даже при застabilизированных параметрах разряда.

Влияние отмеченного эффекта на процесс нанесения покрытий из титана исследовалось с помощью вакуумно-дугового устройства аксиально-симметричной конструкции с водоохлаждаемым катодом и анодом, при наличии соленоидов для стабилизации катодных пятен на рабочей поверхности катода и для фокусировки плазменного потока, который инжектировался в вакуумную камеру, где располагались подложки.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости толщины покрытий из титана при температуре рабочей поверхности катода меньше и больше 770°K соответственно от напряжения смещения на подложке. Кривая 1 соответствует ортогональному расположению подложки вектору скорости потока плазмы при нанесении покрытия, кривая 2 – касательному расположению. При этом ток дугового разряда составлял 100 А, а расстояние от катода до подложки соответствовало 230 мм. Кривая 3 на рисунке 2 получена, при прочих равных условиях, при расстоянии катод-подложка 300 мм.

Установлено, что скорость роста толщины покрытия при “высокой” температуре более чем в два раза выше значения скорости при “низкой” температуре. Увеличение (по модулю) напряжения отрицательного смещения на подложке от плавающего потенциала до -180 В уменьшает скорость роста толщины покрытия примерно в 3 раза, если покрытие наносилось при “низкой” температуре катода и практически не сказывается на скорости роста при “высокой” температуре.

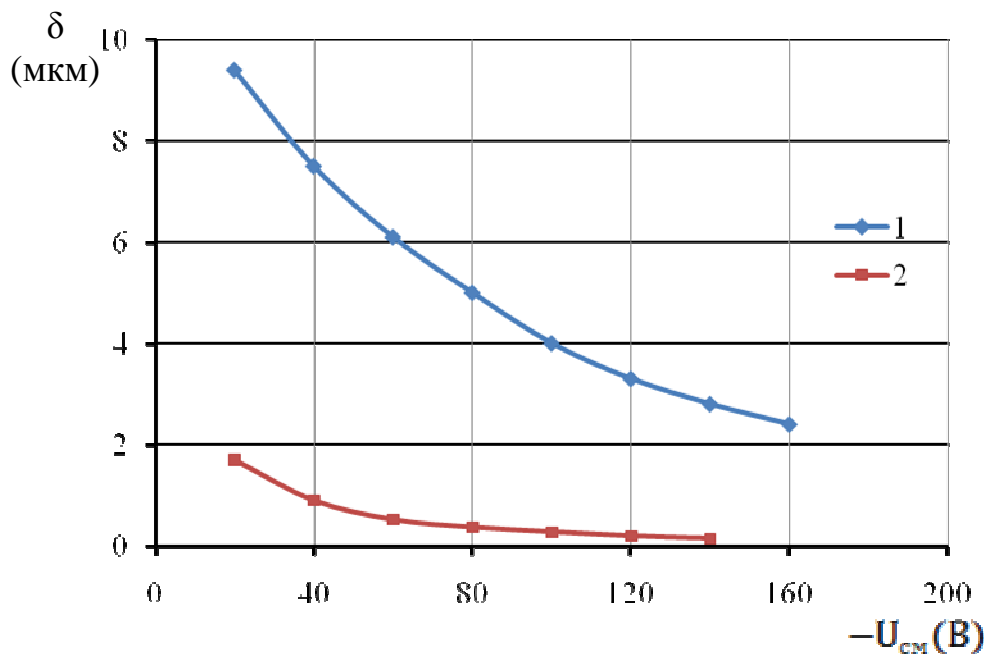


Рис. 1. Зависимость толщины покрытия от напряжения смещения при $T_k < 770^{\circ}\text{K}$.

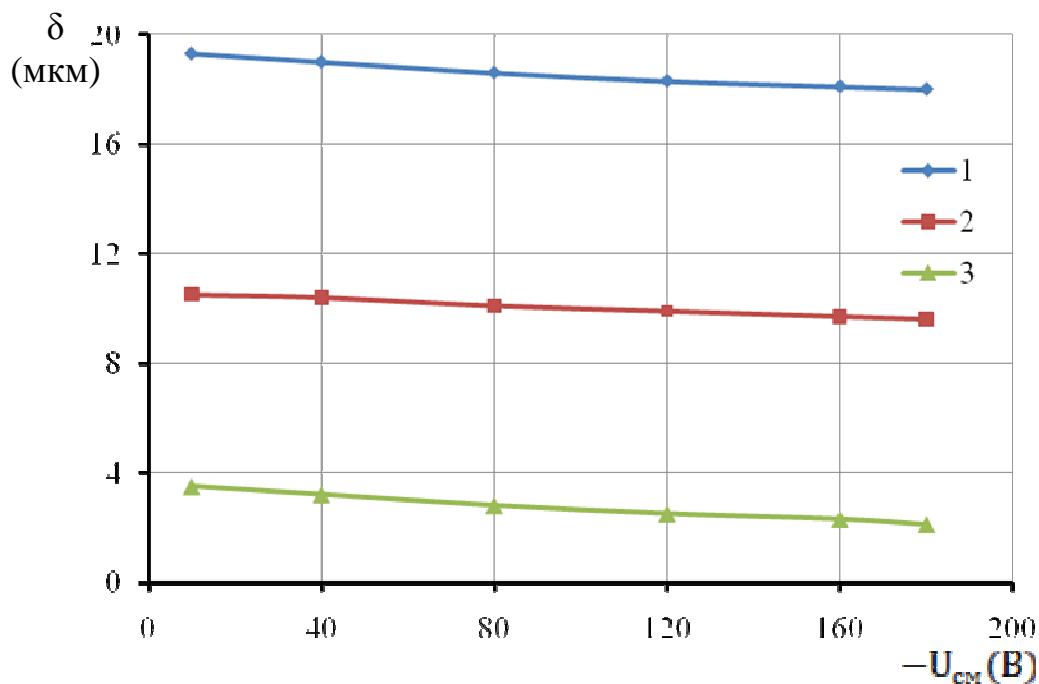


Рис. 2. Зависимость толщины покрытия от напряжения смещения при $T_k > 770^\circ\text{K}$

Результаты исследований, проведенных с помощью рентгеновского дифрактометра, показали, что покрытия, нанесенные при температуре катода, ниже 770°K имеют сложную текстуру. По мере увеличения напряжения отрицательного смещения усиливаются компоненты (110) и (012). При температуре катода выше 770°K эффект ориентации в покрытиях слабо выражен. Выяснено, что покрытие, нанесенное при плавающем потенциале, является бесструктурным.

Поскольку толщина и текстура покрытий в ряде случаев существенно определяет их эксплуатационные свойства, влияние теплового режима катода и величину отрицательного смещения необходимо учитывать при обосновании режимов осаждения. Для получения стабильных по свойствам покрытий необходимо поддерживать температуру катода на заданном уровне. Рассмотрим баланс мощности на катоде.

Мощность P_k , выделяющаяся на катоде вакуумной дуги [2], если привязка разряда к поверхности электрода осуществляется в виде катодных пятен, определяется как

$$P_k = h_k IU, \quad (1)$$

где I – ток вакуумно-дугового разряда, U – падение напряжения на дуге, h_k – коэффициент катодной мощности, определяемый как отношение мощности, выделяющейся на катоде, к полной мощности разряда.

Выделяющаяся на рабочей поверхности катода мощность расходуется на испарение материала, излучение и в результате теплопроводности отводится в систему охлаждения. В наиболее распространенных конструкциях испарителей катод в первом приближении имеет форму цилиндра. Рабочей поверхностью является один торец этого цилиндра, а другой – омывается охлаждающей жидкостью. Мощность, расходуемая на испарение материала, незначительна и составляет единицы процентов от полной мощности разряда.

Следует иметь в виду, что по мере работы катода вследствие эрозии материала его длина уменьшается. За счет улучшения теплоотвода снижается температура поверхности катода T_k и соответственно падает мощность, отводимая излучением. Следовательно, в конце ресурса работы электрода практически вся мощность P_k , выделяющаяся на катоде (без вычета мощности излучения), должна отводиться в систему охлаждения.

Благоприятные с точки зрения уменьшения микрокапельной фракции продуктов эрозии катода условия его работы при снижении температуры по мере уменьшения толщины могут отрицательно сказаться на свойствах покрытий [3]. Изменение количества и размера микрокапель в слоях по мере наращивания толщины покрытия может привести к различному фазовому составу покрытия по толщине и к внутренним напряжениям, ухудшающим адгезию покрытия. Поэтому в ряде случаев целесообразно в процессе нанесения покрытий поддерживать температуру катода на заданном уровне.

Одним из способов поддержания температуры катода на заданном уровне является изменение тока дугового разряда во времени в процессе испарения катода. Делая допущение, что вся мощность, подводимая к катоду из разряда, отводится в систему охлаждения, можно получить

$$T_k - T_c = \frac{P_k L_k}{\lambda S_k}, \quad (2)$$

где S_k – площадь рабочего торца цилиндрического катода; L_k – длина катода; λ – коэффициент теплопроводности материала катода; T_c – температура охлаждаемого торца катода.

Соотношение 2 позволяет связать геометрию катода с мощностью установки и наносимым материалом. Обычно диаметр катода и, следовательно, S_k определяются конструктивными соображениями. Тогда, задавая значение T_k исходя из подходящего температурного критерия или, по крайней мере, не допуская плавления катода, можно с помощью 2 определить длину катода L_k .

Из 2 видно, что если мы хотим поддерживать T_k постоянной (при этом $T_k - T_c$ тоже будет величиной примерно постоянной), необходимо, чтобы произведение $P_k L_k$ было постоянным.

Принято считать, что в первом приближении скорость эрозии материала катода зависит от тока линейно: $\dot{m} = \mu \cdot I$ где μ – коэффициент электропереноса, зависящий от материала катода.

Если принять, что начальная длина катода была L_{k0} , а за время t она уменьшилась на δL_k , то можно записать:

$$L_k(t) = L_{k0} - \frac{\mu \int_0^t I dt}{\rho S_k},$$

$$h_k I U \left(L_{k0} - \frac{\mu \int_0^t I dt}{\rho S_k} \right) = \lambda S_k (T_k - T_c), \quad (3)$$

где ρ – плотность материала катода.

Решая уравнение 3, получим временную зависимость тока дугового разряда, позволяющую регулировать ток во времени для поддержания температуры рабочей поверхности катода на заданном уровне:

$$I = \frac{I_0}{\left(1 - 2 \frac{\mu I_0 t}{\rho S_k L_{k0}}\right)^{1/2}}, \quad (4)$$

где I_0 – начальное значение тока дугового разряда при $t=0$.

Аналогичным образом можно получить выражение для эрозии катода во времени:

$$L_k = L_{k0} \left(1 - 2 \frac{\mu I_0 t}{\rho S L_{k0}}\right)^{1/2}. \quad (5)$$

Таким образом, на процесс взаимодействия потока заряженных частиц с подложкой оказывает влияние состав, энергия и плотность плазменного потока, которые, в том числе, зависят от теплового режима испаряемого материала катода.

Список литературы

1. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. Влияние интегральной температуры катода / И.И. Аксенов и др. // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 21, №4. – С. 646-651.
2. Кузнецов В.Г., Лисенков А.А. Локальное и интегральное тепловое воздействие катодного пятна вакуумной дуги на движущийся ленточный проводник // Металлообработка. – 2009. – №6(54). – С. 14-19.
3. Ветров Н.З., Кузнецов В.Г., Лисенков А.А., Радциг Н.М., Шаронов В.П. Влияние капельной фракции на газопоглощающие свойства титанового покрытия, формируемого из плазмы вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. – 1999. – Т. 9, № 3. – С. 27-30.

Сведения об авторе:

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – д.т.н., заведующий лабораторией.