

## ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА РАВНОМЕРНОСТЬ НАНОСИМЫХ ПОКРЫТИЙ ПО ТОЛЩИНЕ

*Кузнецов В.Г.*

*ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** напряжения, деформации, адгезия, вакуумная дуга, катодное пятно, плазменный поток, покрытие, поверхность, ионная очистка.

**Аннотация.** Применительно к условиям взаимодействия ускоренных потоков металлической плазмы с металлической подложкой анализируется площадь поверхности, которая может быть покрыта однородным по толщине покрытием. При этом учитывается, что покрытие формируется за счет ионного потока, нейтрального пара и микрокапельной фракции. Основным фактором, ограничивающим размер обрабатываемых подложек, является размер зоны, за пределами которой невозможно проведение ионной очистки.

## THE EFFECT OF VACUUM-ARC TECHNOLOGY ON THE UNIFORMITY OF APPLIED COATINGS IN THICKNESS

*Kuznetsov V.G.*

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

**Keywords:** stresses, deformations, adhesion, vacuum arc, cathode spot, plasma flow, coating, surface, ion cleaning.

**Abstract.** In relation to the conditions of interaction of accelerated metal plasma flows with a metal substrate, the surface area that can be coated with a uniform thickness coating is analyzed. At the same time, it is taken into account that the coating is formed due to the ion flux, neutral vapor and micro-droplet fraction. The main factor limiting the size of the processed substrates is the size of the zone beyond which it is impossible to carry out ion cleaning.

Механические напряжения и деформации являются основной причиной, вызывающей повреждение и выход из строя тонких пленок и покрытий. В большинстве случаев требуется получение покрытий с заданной толщиной, адгезионной прочностью и другими свойствами [1, 2]. В связи с этим важным параметром является площадь поверхности, которая может быть покрыта однородным по толщине покрытием.

Для случая испарения, переводящего вещество из конденсированной фазы исключительно в газообразную, пространственное распределение испаряемого вещества описывается уравнениями, полученными на основе базовых законов испарения [3]. Для дискового катода испарителя и плоской подложки, расположенной параллельно эффективной плоскости испарителя, выражение для параметра, характеризующего однородность по толщине, записывается в следующем виде:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1 + (s/h)^2}{\left[1 + (1/h)^2\right]^2 + \left[1 - (1/h)^2\right]^2 \cdot (s/h)^2} \quad \text{для } s \leq 0,1h, \quad (1)$$

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1+(s/h)^2}{2(s/h)^2} - \frac{\left[1+(l/h)^2 - (s/h)^2\right] \left[1+(s/h)^2\right]}{2(s/h)^2 \left\{ \left[1-(l/h)^2\right]^2 + (s/h)^2 + 4(l/h)^2 \right\}^{1/2}} \text{ для } s > 0,1h. (2)$$

где  $s$  – радиус катода испарителя,  $h$  – минимальное расстояние от катода испарителя до подложки,  $l$  – расстояние от центра подложки до исследуемой точки,  $d_0$  – толщина покрытия в центре подложки,  $d$  – толщина покрытия в исследуемой точке.

При исследовании пространственного распределения вещества, генерируемого вакуумно-дуговым испарителем, необходимо учитывать, что продукты эрозии катода неоднородны по своему фазовому составу. Они включают в себя нейтральный пар, ионную составляющую и микрокапельную фракцию. Соотношение между этими компонентами зависит от материала катода, интегральной температуры его поверхности, силы тока дугового разряда и параметров внешнего магнитного поля. Параметры плазмы в месте нахождения подложки, помимо перечисленных факторов, зависят также от его пространственного положения по отношению к катоду [4]. Как отмечалось выше, большая доля капельной фракции выбрасывается под малыми углами к поверхности катода. На характеристики генерации капельной фракции существенное влияние оказывает внешнее магнитное поле. При наличии магнитной системы в виде соленоида проявляется эффект автосепарации капель – количество капель в центральной области плазменного потока резко снижается и основная их доля локализуется на периферии потока. Наряду с этим эффектом, наличие магнитного поля вносит также изменения в пространственное распределение ионной компоненты плазменного потока. Указанные явления приводят к значительному отклонению реального распределения испаренного вещества от распределения, определяемого выражениями (1) и (2).

Экспериментальное определение распределения ионной компоненты плазменного потока осуществлялось путем измерения ионного тока в различных точках вакуумной камеры, а общего распределения всех продуктов эрозии катода – по изменению массы подложки в результате осаждения на нее покрытия. Поскольку толщина осажденного покрытия, определяемая ионным потоком, линейно зависит от плотности ионного тока, можно записать:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{j}{j_0}, (3)$$

где  $j$  – плотность ионного тока в исследуемой точке,  $j_0$  – плотность ионного тока в центре подложки.

Результаты измерения распределения покрытий по толщине, выполненные указанными методами, представлены на рисунке 1.

Кривая 1 построена из численного расчета по формуле (1) для использованного в работе испарителя с катодом диаметром 100 мм. Кривая 2 построена по результатам измерения массы подложки с покрытием, кривая 3 – по результатам измерения ионного тока. Различие в ходе кривых 2 и 3 связано с различным вкладом продуктов эрозии катода в процесс формирования покрытия. Толщина покрытия по кривой 2 обусловлена вкладом ионной, капельной и

паровой составляющих, а по кривой 3 – только ионной составляющей. Кроме того накладывается эффект пространственного распределения микрокапельной фракции. В связи с этим, представляет интерес оценка влияния этого эффекта на процесс распыления поверхности подложки в режиме ионной очистки. Кривая 4 на рисунке 1 построена по результатам оценки толщины распыленного слоя подложки, при бомбардировке ее ионами титана при напряжении 1000 В (здесь:  $d_0$  – толщина распыленного слоя подложки по оси симметрии плазменного потока,  $d$  – толщина распыленного слоя в исследуемой точке). Быстрое уменьшение параметра  $d/d_0$  при росте  $l$  является следствием обогащения периферийной области плазменного потока капельной фракцией, осаждение которой на подложку снижает распыляющее действие ионной компоненты вплоть до полного прекращения распыления подложки и переходу к осаждению покрытия.

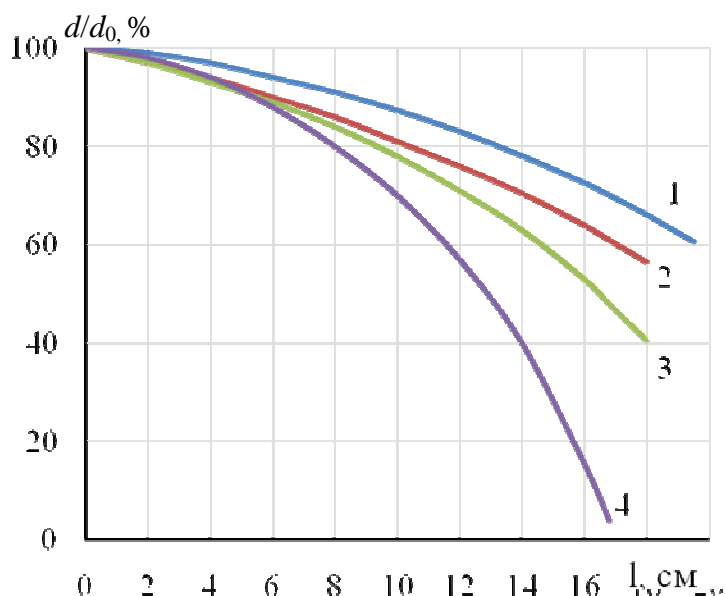


Рис. 1. Распределение толщины осажденного (1, 2, 3) и распыленного слоя (4) в зависимости от расстояния до оси плазменного потока: 1 – из расчета, 2 – на основе методики взвешивания, 3 – на основе измерения ионного тока

Запишем уравнение баланса мощности для обрабатываемой поверхности с единичной площадью, пренебрегая удельной теплотой плавления наносимого материала

$$\frac{j_i}{\xi e} (\xi \xi e_{cm} + W_i + W_{ucn} + W_{ik}) + \frac{d^2 N_c}{dSdt} (W_{ucn} + W_{ck}) \theta - \frac{d^2 N_{ucn}}{dSdt} W_{ucn} - \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0, \quad (4)$$

где  $j_i$  – плотность ионного тока из плазмы на обрабатываемую поверхность;  $\xi e$  – средний заряд иона в плазме;  $U_{cm}$  – напряжение отрицательного смещения между поверхностью и плазмой;  $W_i$  – средняя (с учетом наличия многозарядных ионов) энергия ионизации;  $W_{ucn}$  – энергия испарения наносимого материала в расчете на один атом;  $W_{ik}$  – кинетическая энергия плазменного потока (в пересчете на один ион), обусловленная ускорением плазмы в активной зоне вакуумно-дугового испарителя и в катодных пятнах;  $W_{ck}$  – кинетическая энергия

нейтрального атома;  $\theta$  – коэффициент аккомодации нейтральных атомов на обрабатываемой поверхности;  $\sigma$  – постоянная Стефана Больцмана;  $\varepsilon$  – интегральная излучательная способность обрабатываемой поверхности совместно с наносимым покрытием;  $T$  и  $T_0$  – температуры поверхности и окружающей среды;  $\frac{d^2 N_c}{dSdt}$ ;  $\frac{d^2 N_{ucn}}{dSdt}$  – плотность потока нейтральных атомов на поверхности и плотность потока с обрабатываемой поверхности реиспаренных атомов соответственно.

При напряжении отрицательного смещения между поверхностью и плазмой в несколько десятков вольт в первом приближении можно пренебречь энергетическим вкладом нейтрального потока и процесса реиспарения, что дает основание уравнение баланса (4) записать в виде

$$j_i U_\vartheta - \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0, \quad (5)$$

где  $U_\vartheta$  – эквивалентный потенциал, учитывающий эффекты, отраженные в первых скобках левой части уравнения (4).

Проанализировав типичные численные значения  $W_i$ ,  $W_{ucn}$ ,  $W_{ik}$  для металлических плазм вакуумной дуги, можно заключить, что  $U_\vartheta \approx 100$  В.

При формировании пленки за счет осаждения ионов скорость роста покрытия выразится через плотность ионного тока:

$$V_p = \frac{j_i}{\xi e n_0}, \quad (6)$$

где  $n_0$  – концентрация атомов материала покрытия. В выражении (6) пренебрегаем эффектом самораспыления и считаем равным 1 коэффициент аккомодации осаждаемых на обрабатываемую поверхность ионов.

Для получения пленок высокого качества необходимо, чтобы температура поверхности  $T$  определенным образом соотносилась с температурой плавления наносимого материала ( $T_{пл}$ ):

$$T = \left( \frac{1}{3} \div \frac{2}{3} \right) T_{пл}. \quad (7)$$

Выражая из формулы (6) плотность ионного тока и подставляя в (5), пренебрегая  $T_0^4$  по сравнению с  $T^4$ , учитывая соотношение (7), получаем

$$V_p = \frac{\sigma \varepsilon (0,33 \div 0,66)^4 T_{пл}^4}{\xi e n_0 U_\vartheta}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет приближенно вычислить скорость роста пленочного покрытия с учетом свойств наносимого материала и оптимальной с технологической точки зрения температуры поверхности при осаждении пленки из сильно ионизированной плазмы.

Проиллюстрируем полученный результат примером нанесения пленки из молибдена. Взяв данные по  $e$ ,  $T_{пл}$ ,  $n_0$ , учтя, что для молибденовой плазмы вакуумно-дугового разряда  $\xi = 2$ , получим на основании формулы (8), что оптимальная скорость роста пленки будет лежать в диапазоне  $V_p = 0,25 \div 3,8$  мкм/мин.

Таким образом, встречающиеся в литературе данные о скорости роста пленок, полученные с помощью вакуумно-дуговых испарителей до нескольких десятков мкм в минуту, показывают лишь потенциальные возможности этой техники.

Анализируя приведенные выше данные, можно сделать вывод, что при вакуумно-дуговой обработке больших размеров подложек необходимо учитывать различие размеров областей равномерного распыления подложки в режиме ионной очистки и области равномерного напыления в режиме напыления. Основным фактором, ограничивающим размер обрабатываемых подложек, является размер зоны, за пределами которой невозможно проведение ионной очистки.

#### **Список литературы**

1. Воронин Н.А. Эффект толщины покрытия и материала основы на механические свойства и несущую способность упрочненных поверхностей. Методы упрочнения поверхностей деталей машин / Под ред. Г.В. Москвитина. – М.: КРАСАНД, 2008. – 91 с.
2. Кравчук К.С. Определение адгезионной прочности тонких покрытий методом инструментального индентирования // Трибология машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – С. 257-259.
3. Технология тонких пленок: Справочник: в 2 т. / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М.: Сов. радио. – Т. 1. – 1977. – 768 с.
4. Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Чижик С.А., Вархолинский Б., Гилевич А., Айзикович С.М., Митрин Б.И., Кренев Л.И. Оценка однородности механических свойств покрытия AlCrN триботехнического назначения с применением зондовых методов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 10. – С. 46-54.

#### Сведения об авторе:

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