

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Ю.В. Кунченко, В.В. Кунченко

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Украина*

Поступила в редакцию 19.08.2005

Приводятся расчетные формулы и на их основе анализ распределения скоростей конденсации потоков вещества, генерируемых вакуумно-дуговым источником, толщины покрытий, а также характера формируемых слоистых структур в зависимости от геометрии системы катод – подложка. В качестве примера рассматривается процесс формирования многослойного покрытия на основе нитридов титана и хрома.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности конструкций установок, создаваемых для реализации метода вакуумно-дугового осаждения (в.д.о.) покрытий (наличие нескольких источников плазмы, их взаимное расположение и расстояния до поверхности конденсации – подложки и др.), многообразии форм поверхностей конденсации (в том числе под различными углами по отношению к оси падающего потока, тела вращения и др.), неоднородности распределения плотности потоков и их характеристик в рабочем объеме [1] – все это ставит геометрические факторы в методе в.д.о. в ряд недостаточно полно изученных параметров, существенно влияющих на свойства получаемых покрытий [2].

Одной из отличительных особенностей метода является то, что независимо от формы и размеров катода эмиссия вещества происходит из точечного источника – катодного пятна (КП). При этом распределение основной составляющей осаждаемого потока (ионов) в пространстве при характерных для метода относительно малых токах горения вакуумной дуги (~100 А) соответствует косинусоидальному закону [1, 3 – 5].

Изменением геометрической формы и размеров катодов, а также применением различных методов управления перемещением КП по поверхности катодов достигается решение ряда технических задач, связанных с созданием вакуумно-дуговых адсорбционных насосов [6], установок для нанесения покрытий на различные поверхности, в том числе и на поверхности вращения, внутренние полости

изделий [5, 7]. При этом свойства получаемых покрытий во многом определяются скоростью осаждения, характером их распределения по поверхности конденсации, толщиной слоев. В связи с этим представляют практический интерес работы по созданию методов, моделей расчета этих характеристик. Предлагаемые в работе [8] решения задач, связанных с массопереносом вещества, имеют либо весьма общий характер, либо посвящены частным случаям [9, 10]

Модель представленная в работе [8], описывающая процесс осаждения покрытий для частного случая испарения вещества изверху расположенного катода, позволяет находить распределение потока частиц по радиусу подложки в зависимости от расстояния до катода – испарителя и технологических параметров осаждения. Однако она не пригодна для расчетов в случае нанесения покрытий с бокового катода или при одновременной работе нескольких источников. Предложенная авторами [5] комплексная модель осаждения покрытий методом КИБ позволяет производить расчеты энергии прибытия частиц на подложку, распределение их по радиусу подложки, толщины покрытия на плоских образцах и вдоль оси в зависимости от любого варианта расположения катодов в камере. Но и в данной работе не рассматривается практически важный вариант создания многослойных покрытий путем конденсации потоков, генерируемых несколькими одновременно работающими источниками на вращающуюся поверхность.

Настоящая работа посвящена изучению распределения скоростей конденсации потоков вещества, генерируемых несколькими вакуумно-дуговыми источниками, толщины получаемых покрытий, характера формируемых слоистых структур в зависимости от геометрии системы катод – подложка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В основу расчетов положены следующие положения:

- источник плазменных потоков – точечный;
- распределение вещества в пространстве подчиняется косинусоидальному закону;
- коэффициент прилипания (конденсации) $K = 1$.

Рассматривается характер распределения скоростей конденсации вакуумно-плазменных потоков для случаев различных комбинаций испаритель – подложка, которые реализуются в технологических процессах вакуумно-дугового осаждения с использованием установок типа «Булат».

РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ КОНДЕНСАЦИИ

Рассматриваемые далее варианты являются приближением к реально существующему движению КП в плоскости катода в зоне их локализации. При этом размеры зоны, характер перемещения КП в ней и всей зоны в целом в плоскости катода определяется технологическими параметрами (ток дугового разряда I , электромагнитные поля системы удержания, перемещения КП, геометрия катода и пр. [3, 7]). В связи с этим реальный характер распределения скоростей осаждения, толщины покрытия будут определяться суперпозицией потоков, генерируемых точечными источниками, локализованными в этой зоне или на площади перемещения всей зоны.

Распределение скоростей конденсации (V) потока, генерируемого точечным источником (F) при осаждении на неподвижную плоскость отстоящую от источника на расстоянии R (рис. 1).

Из-за симметричности потока это распределение будет определяться значением координаты (h) текущей точки (A) и может быть

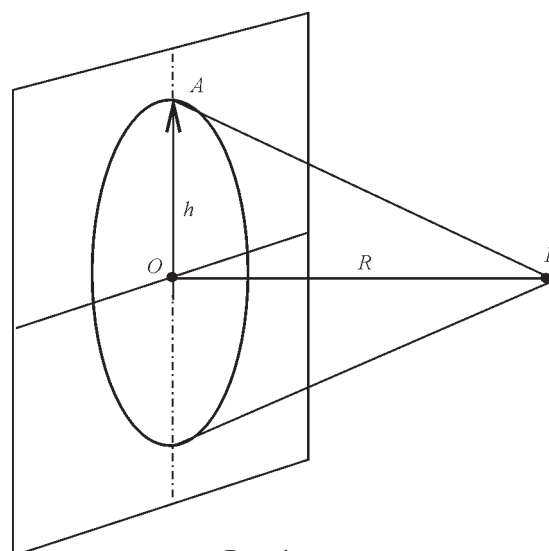


Рис. 1.

выражено через известную из эксперимента величину скорости конденсации (V_0) в точке (O) – нормальной проекции источника (F) на плоскость:

$$V = V_0 \frac{R^4}{(R^2 + h^2)^2} \quad (1)$$

Конденсация на плоскость из точечного источника, движущегося по отрезку прямой (1), параллельной плоскости конденсации (рис. 2).

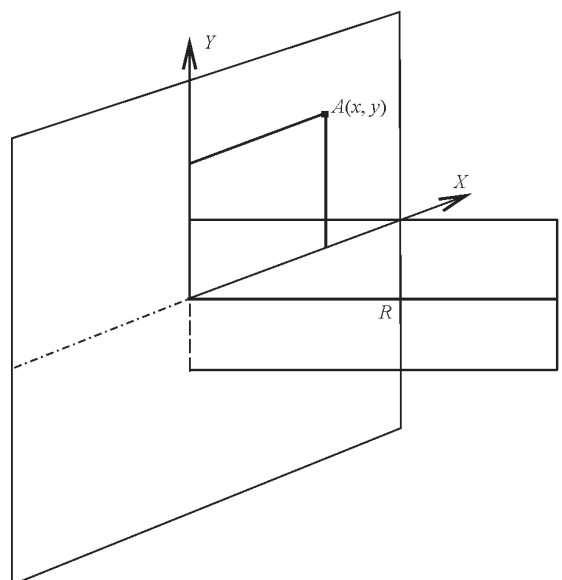


Рис. 2.

Скорость конденсации в произвольной точке $A(x, y)$ в плоскости конденсации будет выражаться:

$$V = V_0 \int_{-1/2}^{1/2} \frac{R^4 \cdot dl}{[R^2 + x^2 + (y-l)^2]^2} \quad (2)$$

Конденсация из точечного источника, перемещающегося по системе отрезков длиной l , параллельных плоскости конденсации и разделенных промежутками (a) (рис. 3).

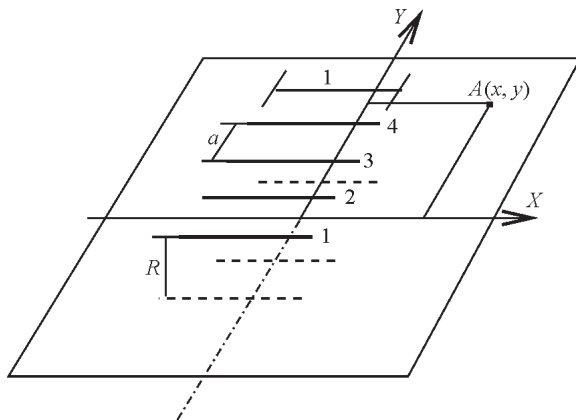


Рис. 3.

Для случая нечетного числа отрезков $n = 2m + 1$ скорость конденсации в произвольной точке $A(x, y)$, лежащей в плоскости конденсации, может быть рассчитана при помощи выражения:

$$V = V_0 \sum_{i=-m}^{i=m} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{R^4 \cdot dl}{[R^2 + x^2 + (y - l \cdot a - l^2)^2]^2}. \quad (3)$$

Толщина конденсатов пропорциональна скорости. Компьютерная обработка позволяет получить соответствующий характер распределения толщин (H) конденсатов в выбранной системе координат (рис. 4).

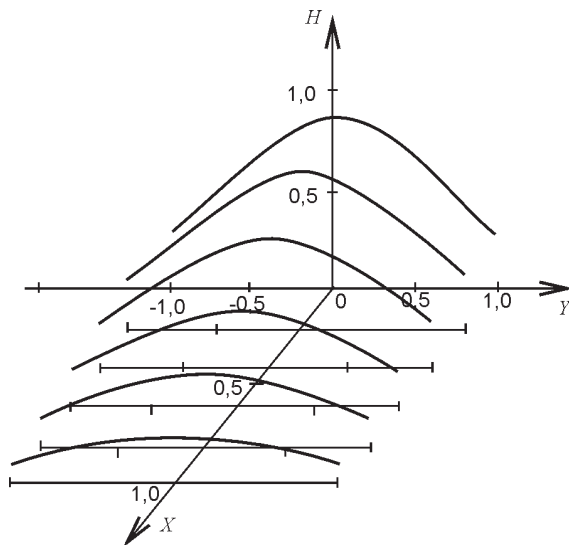


Рис. 4.

Конденсация из точечного источника на элементарную площадку (dS), вращающуюся вокруг оси, лежащей в плоскости (рис. 5).

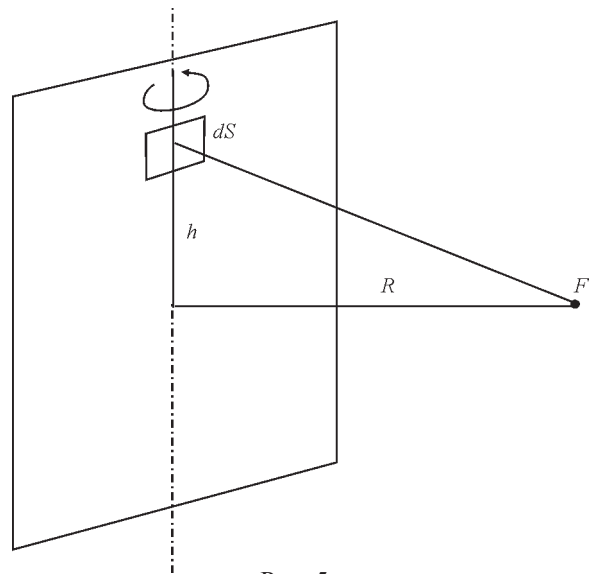


Рис. 5.

Скорость конденсации определяется следующим образом:

$$V = V_0 \frac{R^4 \cdot \cos \beta}{(R^2 + h^2)^2}. \quad (4)$$

где β – угол поворота.

Распределение толщины конденсатов, получаемых по схеме 1 и 5, представлены соответственно кривыми 1 и 2 на рис. 6.

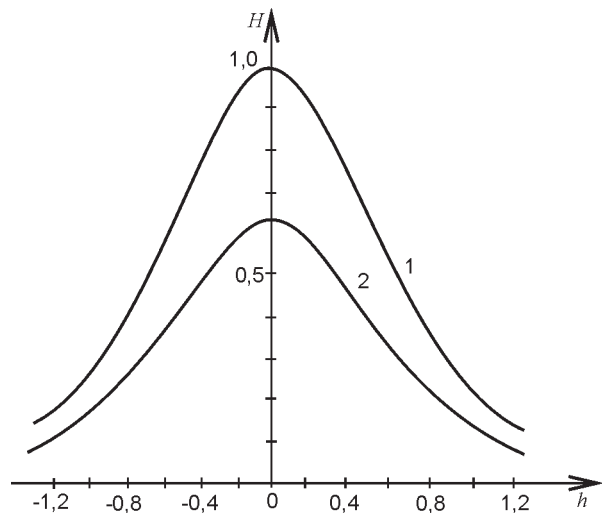


Рис. 6.

В случае, если точечный источник при этом перемещается по отрезку l (рис. 7), скорость конденсации на эту площадку будет выражаться:

$$V = V_0 \int_{-l/2}^{l/2} \frac{R^4 \cdot \cos \beta \cdot dl}{(R^2 + h^2)^2}. \quad (5)$$

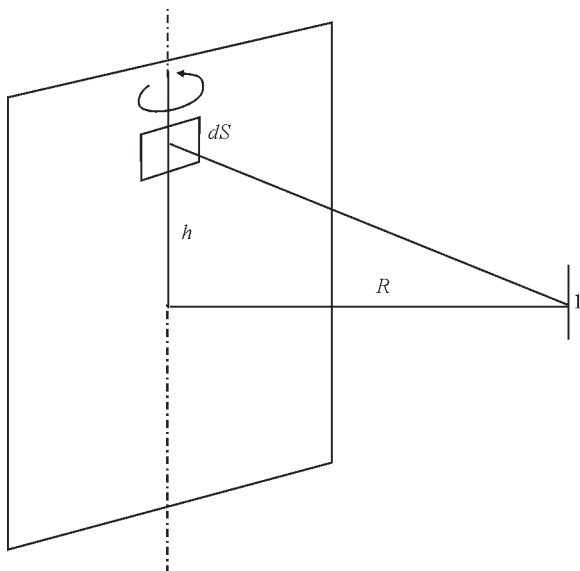


Рис. 7.

Некоторые конструкции установок для нанесения покрытий имеют подложкодержатели в виде цилиндров радиуса r , на которых размещаются плоские изделия (рис. 8).

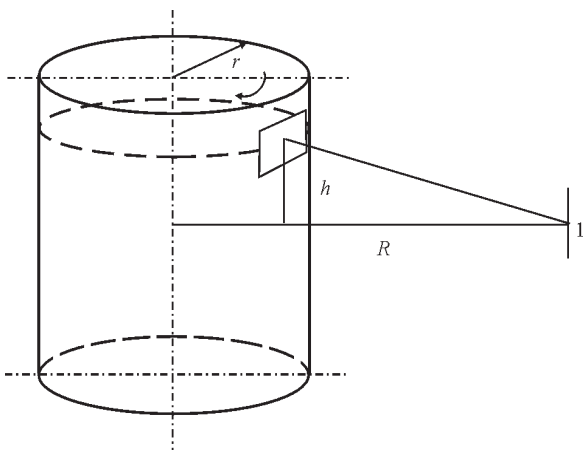


Рис. 8.

В таком случае скорость конденсации из точечного источника на площадку, вращающуюся вокруг оси цилиндра, будет равна:

$$V = V_0 \frac{R^4}{(R^2 + h^2)^2} \frac{R^2 (R \cdot \cos\beta - r)(R - r \cdot \cos\beta)}{(R^2 + r^2 - 2Rr \cos\beta)^2} \quad (6)$$

Соответствующий характер распределения толщины получаемых конденсатов (за один оборот подложкодержателя) представлен на рис. 9, где $r' = r/R$.

В случае линейно-протяженного источника формула (6) для расчета скорости конденсации преобразуется:

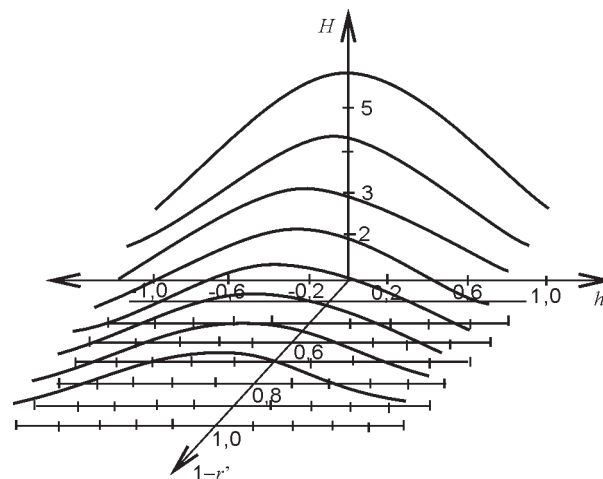


Рис. 9.

$$V = V_0 \int_{-1/2}^{1/2} \frac{R^4 \cdot R^2 (R \cdot \cos\beta - r)(R - r \cdot \cos\beta) \cdot dl}{[R^2 + (h-l)^2]^2 (R^2 + r^2 - 2Rr \cos\beta)^2} \quad (7)$$

Соответствующее распределение толщины конденсатов, полученных за один оборот в зависимости от параметров h и $r' = r/R$, представлено на рис. 10.

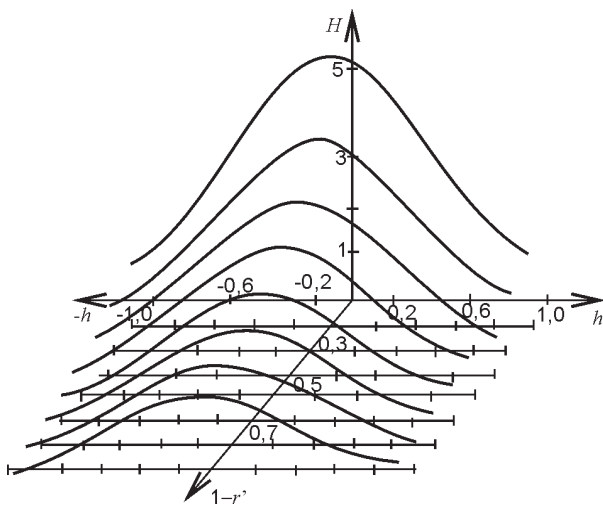


Рис. 10.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

Конструкция установок типа “Булат” предусматривает размещение упрочняемых изделий на поверхности вращения (подложкодержатель) различного радиуса (r), а, следовательно, и расстояния до испарителей (рис. 11). Оно может быть изменено в пределах геометрических размеров камеры (R).

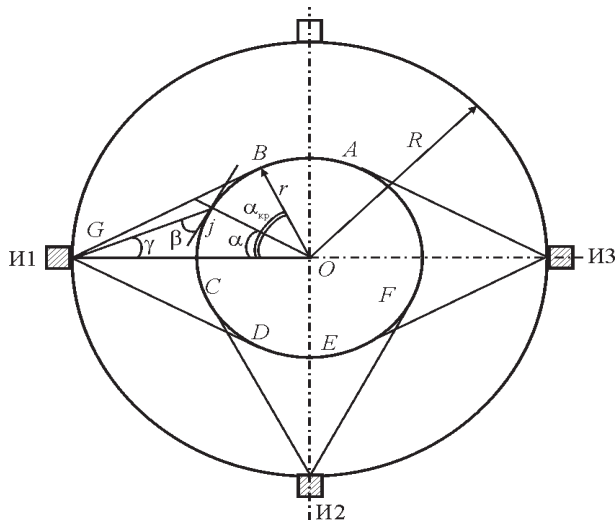


Рис. 11.

При этом в процессе вращения поверхность изделия проходит поочередно зоны под действующими испарителями. В зависимости от расстояния до испарителя, скорости вращения (ω), количества работающих испарителей, материала катода испарителей на поверхности изделия будут осаждаться соответствующие слои. В случае конденсации вещества на вращающуюся единичную поверхность, расположенную от оси камеры на расстоянии r при одновременно работающих трех испарителях, находящихся на окружности радиуса R , существуют: теневая область пространства, в которой не происходит конденсация прямого потока вещества (рис. 11 AB), области, в которых происходит конденсация вещества, испаряемого только одним испарителем (BC, DE, FA), а также области, где перекрываются с разной степенью (в зависимости от соотношения r/R и угла поворота подложкодержателя) потоки от двух испарителей (CD, EF). Легко видеть, что при $r/R \approx 0,71$ области CD и EF не реализуются.

В зависимости от величины радиуса окружности подложкодержателя (r) при данном R угловая величина перечисленных областей, а также скорость конденсации в произвольной точке (j) будут изменяться в зависимости от угла поворота подложкодержателя (α), угла вылета частиц испаряемого вещества (γ), угла падения потока частиц на выбранную площадку (β).

Для определения скорости конденсации в произвольной точке (j) рассматривается упрощенный случай конденсации из одного испарителя на неподвижную подложку, расположенную в центре окружности (O). При скорости конденсации при нормальном падении потока на площадку скорость конденсации в точке j будет определяться выражением:

$$V_j = V_0 \frac{\cos \gamma \cdot \cos \beta \cdot R^2}{(Gj)^2}. \quad (8)$$

Из треугольника GjO определяются соответствующие значения углов γ, β и Gj ; после подстановки в (8) уравнение преобразуется к виду:

$$V_j = V_0 \frac{R^2 (R \cdot \cos \alpha - r)(R - r \cdot \cos \alpha)}{(R^2 + r^2 - 2R \cdot r \cdot \cos \alpha)^2}, \quad (9)$$

где α – текущие значения угла поворота подложкодержателя.

Разделив числитель и знаменатель выражения (9) на R^4 , и обозначив (r/R) через r' , получим:

$$V_j = V_0 \frac{(\cos \alpha - r')(1 - r' \cdot \cos \alpha)}{[1 + (r')^2 - 2r' \cdot \cos \alpha]^2}. \quad (10)$$

Толщина конденсированного слоя будет равна:

$$h_i = V_0 \int_{-\alpha_{кр.}}^{\alpha_{кр.}} \frac{(\cos \alpha - r')(1 - r' \cdot \cos \alpha) d\alpha}{[1 + (r')^2 - 2r' \cdot \cos \alpha]^2}. \quad (11)$$

Пределы интегрирования определяются из выражения:

$$|\alpha_{кр.}| = \arccos(r/R) = \arccos(r'). \quad (12)$$

Из рис. 11 определяются значения начальных границ областей BC, DE, FA, CD, EF, AB , и, таким образом, толщина слоев, получаемых за один полный оборот подложкодержателя.

Обозначив подынтегральное выражение через $f(\alpha, r') da$, можно определить толщину слоев, получаемых за один оборот подложкодержателя, в случае работы трех испарителей:

$$H = V_1 \int_{-\alpha_{кр.}}^{\alpha_{кр.}} f(\alpha, r') d\alpha + (V_1 + V_2) \times \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \times \int_{\pi/2-\alpha_{кр.}}^{\alpha_{кр.}} f(\alpha, r') d\alpha + V_2 \int_{-\alpha_{кр.}-\pi/2}^{\pi/2-\alpha_{кр.}} f(\alpha, r') d\alpha + (V_2 + V_3) \times \\ & \times \int_{-\alpha_{кр.}}^{\alpha_{кр.}-\pi/2} f(\alpha, r') d\alpha + V_3 \int_{-\pi/2+\alpha_{кр.}}^{\alpha_{кр.}} f(\alpha, r') d\alpha, \quad (13) \end{aligned}$$

где V_1, V_2, V_3 – скорости конденсации соответственно 1, 2 и 3 испарителей при нормальном падении конденсируемого потока на площадку, расположенную в центре окружности испарителей. Зная угловую скорость вращения подложкодержателя (ω), можно определить толщину слоев (h) и полную толщину слоя (H), осаждаемого за один оборот. Для этого подставляют значения $\alpha = \omega \cdot t$ в выражении (11), и, зная значения подынтегральной функции, определяют толщины каждого слоя при помощи выражения (13).

В качестве примера найдены распределения скоростей конденсации для случая трех, одновременно работающих, испарителей с одинаковой скоростью испарения V_0 (рис. 12).

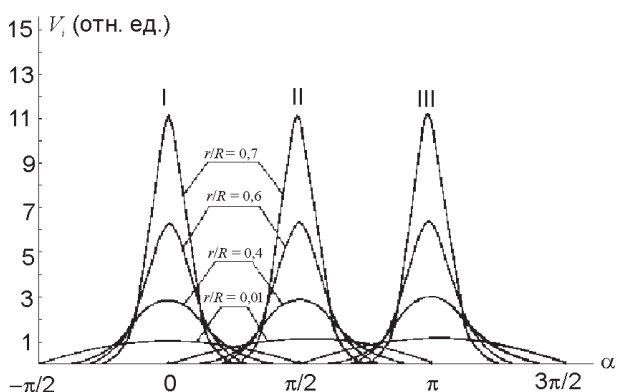


Рис. 12.

Соответствующая проекция значений скоростей конденсации в плоскости, определяемой координатами (r/R), α , дает возможность проиллюстрировать области “перекрывания” потоков при конденсации. На рис. 13 в силу симметрии выбранных условий работы испарителей приведено распределение для двух испарителей.

Характер изменения максимальной скорости конденсации от расстояния (L) для одного испарителя по оси падения пучка, перпендикулярной плоскости конденсации, пред-

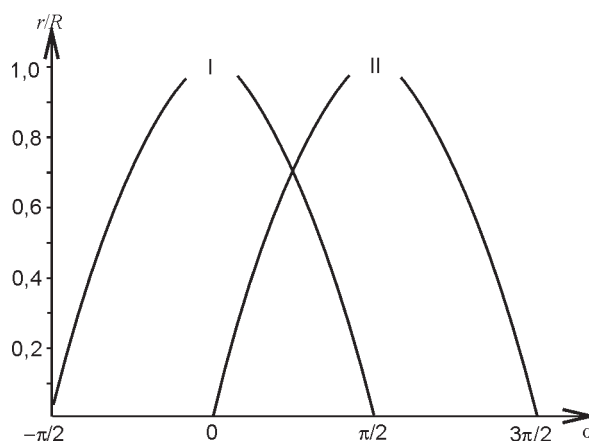


Рис. 13.

ставлен на рис. 14 и определяется выражением:

$$V_{\max} = V_0 \frac{R^2}{(R-r)^2}. \quad (14)$$

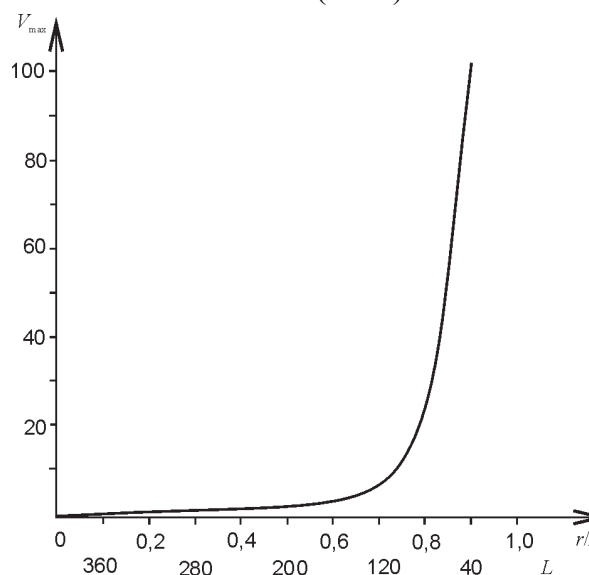


Рис. 14.

На рис. 15 приведен пример расчета зависимости от расстояния (L) катод – подложка или (r/R) мертвого пространства (τ) в град между 1 и 2 испарителем, распределения толщин слоев конденсата, получаемых за один оборот (при скорости вращения подложкодержателя ≈ 9 об./мин) при работе трех испарителей. Причем, 1 и 3 – материал катода – титан, 2 – хром. В качестве значений V_0 взяты скорости конденсации (получения нитридов титана и хрома), равные для титана $V_{0Ti} = 1,62$ нм/с, $V_{0Cr} = 0,75$ нм/с при $R = 400$ мм ($r = 0$).

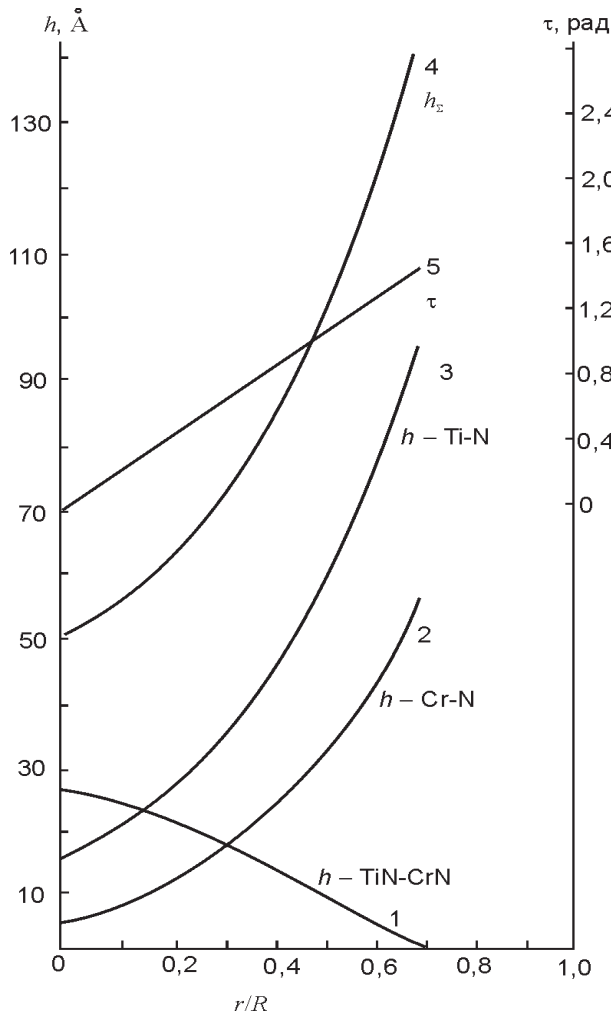


Рис. 15.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что на установках типа “Булат” можно в широких пределах изменять соотношение толщин слоев в покрытии за счет изменения параметров (r/R) и V_{0i} , и, таким образом, “конструировать” необходимые слоистые структуры. В частности, в рассмотренном случае для условий эксперимента, близких к реализуемым на установках “Булат” при (r/R) = 0,5 и принятых скоростях конденсации, формируется слоистая структура, схема которой представлена на рис. 16.

Из этой схемы и рис. 15 следует, что получаемые в таких условиях конденсаты представляют собой структуры с чередованием различных по составу слоев на основе титана и хрома, а также их смеси. При этом наблюдается особенность в получаемых структурах, обусловленная существующей конструкцией установки: геометрическое расположение 1 и 3 испарителей, угловое расстоя-

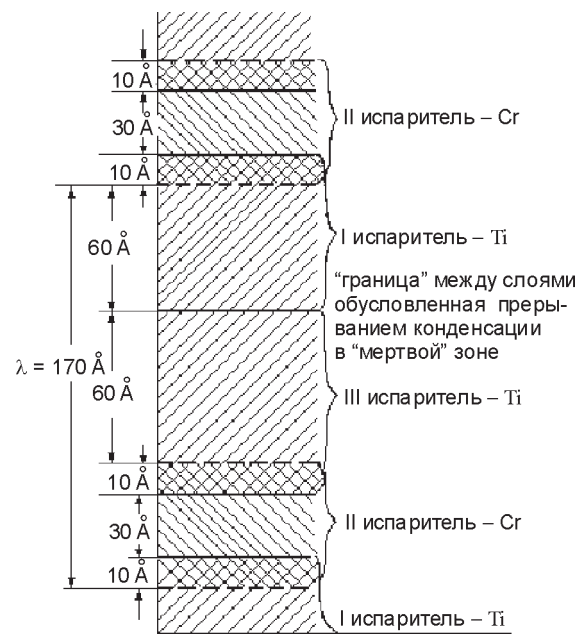


Рис. 16.

ние между которыми составляет величину π . Это обуславливает существование “мертвого пространства” при конденсации, что эквивалентно паузе в процессе конденсации на выбранную поверхность. Роль этой паузы при конденсации из 1 и 3 источников одинакового металла (например, титан) или тем более разнородных металлов сводится к формированию границы раздела между соответствующими слоями (рис. 16, “τ-граница”). Величина этой паузы определяется отношением (r/R) и скоростью вращения подложкодержателя.

Для рассмотренных условий конденсации электронно-микроскопическое изучение торцевых сечений получаемых покрытий

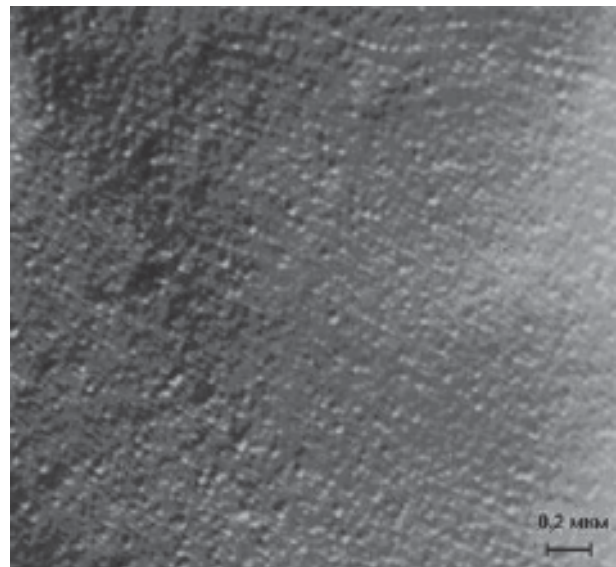


Рис. 17.

показывает (рис. 17) наличие слоев, которые по порядку величины (20 нм) совпадают с расчетными ($l \approx 17$ нм).

Однако природа формирования таких слоев требует специального более глубокого изучения. Обусловлено это тем, что структура формирующегося конденсата не представляет собой механическую смесь компонентов осаждаемого плазменного потока. Приповерхностный слой в процессе конденсации подвергается бомбардировке достаточно высокоэнергетичными ионами осаждаемого материала [11, 12]. Это обуславливает радиационно-стимулированные процессы “перемешивания”, перераспределения компонентов формирующегося покрытия [13], протекания плазмохимических реакций, следствием которых является образование соответствующих соединений [14, 15]. Толщина слоев может отличаться от расчетных, определяясь не только геометрическими, но и физико-химическими параметрами (условиями) в зоне конденсации (плотность потока, энергия ионов, температура и др.). В определенной мере эти характеристики учитываются использованием в расчетах значений V_0 , полученных экспериментально для данных материалов покрытий, что далеко не всегда совпадает с табличными характеристиками.

В реальных условиях коэффициент конденсации не равен 1, т.к. существует распыление в процессе конденсации частиц (ионов) с достаточно высоким уровнем энергии (>100 эВ), а коэффициент распыления зависит от угла падения потока по отношению к плоскости конденсации, и угловое распределение в условиях фокусировки потоков, их рассеяния на газовой мишени не подчиняется косинусоидальному закону [7]. В связи с этим возникает необходимость определения угловых соотношений [2, 8 – 16] для рассмотренных случаев.

Угол падения ионов (без учета изменения их траектории в Дебаевском слое [6]) для случаев 1, 2, 4 – 6 будет определяться:

$$1. \quad \beta_1 = \arccos \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}} \right), \quad (15)$$

$$2. \quad \beta_2 = \arccos \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2 - (y - l)^2}}, \quad (16)$$

$$4. \quad \beta_4 = \arccos \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2}} \cdot \cos \alpha, \quad (17)$$

$$5. \quad \beta_5 = \arccos \frac{R \cdot \cos \alpha}{\sqrt{R^2 + (h - l)^2}}, \quad (18)$$

$$6. \quad \beta_6 = \arccos \frac{R^2 + r^2 - R(1 + \cos \alpha) - 2R^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2(R - r)\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha + h^2}}. \quad (19)$$

Таким образом, при необходимости в формулах расчета скоростей конденсации, толщин слоев могут быть введены множители, учитывающие угловые зависимости коэффициента распыления и пространственного распределения потока частиц.

ВЫВОДЫ

Приводятся расчетные формулы и на их основе анализ распределения скоростей конденсации потоков вещества, генерируемых вакуумно-дуговым источником, толщины получаемых покрытий, а также характер формируемых слоистых структур в зависимости от геометрии системы катод – подложка.

Предложена модель формирования слоистых покрытий методом вакуумно-дугового осаждения на поверхность конденсации, вращающуюся вокруг оси камеры и последовательно пересекающую потоки, генерируемые тремя одновременно работающими испарителями установки типа “Булат”.

Показано удовлетворительное соответствие расчетных характеристик толщины ламелей слоистых покрытий $\text{TiN}_x/\text{CrN}_x$ с наблюдаемыми электронно – микроскопически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы//Харьков: ННЦ ХФТИ. – 2005. – С. 212.
2. Кунченко В.В., Костенец В.В., Мирошниченко Ю.Т. и др. Исследование свойств молибденовых конденсатов, получаемых методом вакуумно-плазменного осаждения (способ КИБ). II Влияние ориентации подложки

- относительно плазменного потока на микро-структурные характеристики молибденовых конденсаторов//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1983. – Вып. 2(25). – С. 88-91.
3. Андреев А.А. Электро-магнитная модель катодного пятна вакуумной дуги//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2003. – № 4(3). – С. 203-207.
 4. Андреев А.А. Саблев Л.П. Шулаев В.М. Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия//Харьков, ННЦ ХФТИ. – 2005. – С. 236.
 5. Любимов В.В., Иванов А.В. Комплексная модель процесса осаждения покрытий методом КИБ// Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (ОТТОМ), Харьков.–2003. –Разд. 3. – С. 281-286.
 6. Саблев Л.П., Долотов Ю.И., Гольдинер Е.Г. и др. Получение и измерение вакуума//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика и техника высокого вакуума. –1973. – Вып. 1(1). – С. 21-29.
 7. Sablev L.P., Andreev A.A., Kunchenko V.V., Grigoriev S.N. Vacuum-Arc Evaporated of Metals with an Extended Planar Cathode//Proc. Of the TATF'98, Regensburg, 1998.
 8. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. – М.: Атомиздат, 1980.
 9. Воеводин А.А., Ерохин А.Л. Исследование энергетических характеристик ионизированных потоков Ti методом Монте-Карло//Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 6. – С. 151-152.
 10. Воеводин А.А., Любимов В.В., Ерохин А.Л. Моделирование роста пленок, получаемых ионно-плазменным осаждением в вакууме// Вопросы атомной науки и техники. Сер.: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1992. – № 1(62). – С. 121-123.
 11. Месяц Г.А., Беренгольд С.А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги// УФН. – 2002. –Т. 172, № 10. – С. 1113-1130.
 12. Хороших В.М. Стационарная вакуумная дуга в технологических системах для обработки поверхностей//Физическая инженерия поверхности. – 2003. – Т.1. – №1. – С. 19-26.
 13. Бугаев Е.А., Зубарев Е.Н., Кондратенко В.В., Пеньков А.В., Першин Ю.П., Федоренко А.И. Структурные и фазовые превращения в многослойных рентгеновских зеркалах при их конденсации и отжиге//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 1999. – № 1. – С. 102-110.
 14. Аксенов И.И., Антуфьев Ю.П., Брень В.Г., Дикий Н.П., Кудрявцева Е.Е., Кунченко В.В. и др. Влияние давления газа в реакционном объеме на процесс синтеза нитридов при конденсации плазмы металлов //Химия высоких энергий. –1986. – Т. 20, № 1. – С. 82-86.
 15. Кунченко Ю.В., Кунченко В.В., Картмазов Г.Н., Неклюдов И.М. О формировании нанослойных покрытий методом вакуумно-дугового осаждения//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т.2, № 1-2. – С. 102-108.
 16. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Эрозия поверхности материалов при облучении ускоренными частицами//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1984. – Вып. 1(29). – С. 187-200.

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ ПОКРИТТІВ, ОДЕРЖУВАНИХ НА УСТАНОВКАХ ТИПУ “БУЛАТ”

Ю.В. Кунченко, В.В. Кунченко

Надаються розрахункові формули й на їхній підставі аналіз розподілу швидкостей конденсації потоків речовини, які генеруються вакуумно-дуговим джерелом, товщини покриттів, а також характеру формованих шаруватих структур залежно від геометрії системи катод – підкладка. Як приклад розглядається процес формування багатошарового покриття на основі нітридів титану й хрому.

THE MODEL OF LAYERED FILMS FORMATION OBTAINED IN INSTALLATIONS OF BULAT TYPE

Yu.V. Kunchenko, V.V. Kunchenko

Analysis of speed distribution of matter flows condensation, which are generated by vacuum-arc source, analyses of covering thickness, as well as the nature of formed layered structures depending on geometry of the system “cathode-substrate” are carried out on the basis of calculation formula given in the present work. Formation process of multi-layer covering on the basis of Ti and Cr nitrides is considered as an example.