Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0448

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 458–481.

DOI: **10.7463/1114.0733662**

Представлена в редакцию: 23.09.2014
Исправлена: 2410.2014

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.793

Анализ распределения толщины тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении на установках с планетарным перемещением подложки

профессор, д.т.н. Сагателян Г. Р.[1,*], Шишлов А. В.[1]

*h_sagatelyan@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложена методика расчета эпюры ожидаемого распределения толщины тонкопленочного покрытия по плоской поверхности подложки, совершающей планетарное движение в плоскости, перпендикулярной к напыляемой плоскости при ионно-плазменном напылении с магнетронным распылением мишеней. Методика основана на применении полученных математических зависимостей, позволяющих для каждой рассматриваемой точки напыляемой поверхности в процессе планетарного движения подложки определять расстояния до источников распыления напыляемого материала, а также углы направленности из источников напыляемого материала в рассматриваемую точку и углы падения в рассматриваемую точку материала из источников напыляемого материала. Созданная на основе предложенной методики компьютерная программа позволяет выбирать наиболее рациональные сочетания кинематических и геометрических факторов процесса напыления как на существующих, так и на проектируемых новых установках магнетронного напыления.

Ключевые слова: Ионно-плазменное напыление, магнетронное распыление, тонкопленочное покрытие, толщина, неравномерность, планетарный механизм, скорость напыления

Введение

Магнетронное напыление, т. е. технология нанесения тонких плёнок на подложку в вакууме с использованием явления магнетронного распыления мишени, давно и прочно заняло свое место в получении функциональных покрытий для самых разных применений как в микроэлектронике, так и в других отраслях промышленности [1]. Это обусловлено тем что, несмотря на ряд недостатков, магнетронное напыление имеет множество достоинств - таких как удобство применения, высокое качество покрытий и большой запас напыляемого материала.

Примерами функциональных покрытий, определяющих работу ответственных деталей изделий точного приборостроения, являются обкладки из золота на кварцевой

пластине, формирующие емкостной датчик маятниковых акселерометров [2], электрорезистивный слой, напылённый на полиимидную подложку, формируя нагревательные элементы и стабилизаторы температуры гироприборов [3] и т. д. Кроме того, подвергнутые фотолитографической обработке тонкопленочные покрытия применяют в качестве масок для формирования методами плазмохимического травления специфических разновидностей рельефа на поверхностях деталей приборов [4]. В частности, двухкомпонентное тонкопленочное покрытие титан-алюминий может использоваться в качестве материала маски при плазмохимическом травлении с целью формирования выступов и впадин на кварцевой пластине акселерометра новой конструкции [5].

Принцип магнетронного распыления основан на образовании над поверхностью катода кольцеобразной плазмы в результате столкновения электронов с молекулами газа (чаще всего аргон). Для эффективной ионизации аргона, распыляемый материал (мишень) размещают на магните. В результате эмиссионные электроны, вращающиеся вокруг магнитных силовых линий, локализуются в пространстве и многократно сталкиваются с атомами аргона, превращая их в ионы.

Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода и бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде тонкой плёнки на детали – подложке (цель процесса напыления), а также частично рассеиваются на молекулах остаточных газов и осаждаются на стенках рабочей вакуумной камеры и оснастке.

Целью выполнения операции напыления является не только получение тонкой пленки, но также и обеспечение равномерности её толщины по подвергаемой напылению поверхности подложки.

Основными причинами возникновения неравномерности толщины покрытия на подложке являются следующие.

1) Различные точки поверхности подложки находятся на различных расстояниях от источника напыляемого материала, а поскольку рассеивание распыленных с поверхности мишени частиц напыляемого материала увеличивается с увеличением расстояния от источника до точки на поверхности подложки, то, при прочих равных условиях, в точках подложки, расположенных на большем удалении от источника, толщина формируемого покрытия окажется меньше.

2) При магнетронном распылении мишени поток распыленных частиц из точки распыления наиболее интенсивен в направлении, перпендикулярном к плоскости мишени, а в направлениях, отличающихся от перпендикулярного к плоскости мишени, интенсивность потока распыленных частиц уменьшается в соответствии с особенностями конфигурации, доходя до нуля в направлении, параллельном плоскости мишени.

3) При формировании покрытия на подложке, за счет конденсации распыленных частиц мишени наибольшая толщина покрытия соответствует попаданию частиц на подложку под прямым углом к напыляемой поверхности, а с увеличением отклонения от

перпендикулярности попадания частиц на напыляемую поверхность, толщина формируемого покрытия уменьшается вследствие возрастания количества частиц, отражаемых от напыляемой поверхности подложки.

Несмотря на исключительную важность обеспечения равномерности свойств функциональных покрытий, вопросам разработки методик расчета распределения толщины покрытий по всей напыляемой поверхности детали до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

Состояние вопроса о неравномерности толщины при напылении покрытий

Причины возникновения неравномерности тонкопленочного покрытия на подложке указаны выше. Принято считать, что указанные причины приводят к возникновению неравномерности толщины напыленного покрытия в соответствии с законом косинусов Ламберта – Кнудсена [6]. Так, в работе [7] приведена математическая модель, в соответствии с которой скорость роста напыляемой пленки в рассматриваемой точке прямо пропорциональна произведению косинусов углов эмиссии и конденсации и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника напыляемого материала до рассматриваемой точки. При этом в работе [7] данная математическая модель не применена к расчетам каких-либо вариантов конструктивного устройства систем напыления.

Определенные попытки разработать расчетные математические модели формирования неравномерности тонкопленочного покрытия применительно к конкретному классу установок вакуумного напыления предприняты в работе [8]. Авторы работы составили в самой общей форме интегро-дифференциальное уравнение для кольцевого испарителя и решили его применительно к неподвижной подложке, располагаемой параллельно плоскости испарителя.

Дальнейшие исследования по уменьшению разнотолщинности напыленных покрытий в работе [8] рекомендовано свести к оптимизации конфигурации магнетронных излучателей, мотивируя это тем, что аналитические расчеты скорости роста толщины покрытия в разных точках подложки при ее сложном движении относительно испарителя весьма затруднительны.

Полноценная методика расчета распределения толщины покрытия, формируемого кольцевым испарителем, приведена в работе [9]. Здесь построена модель процесса напыления для случая, когда мишень и подложка параллельны и соосны, т.е. распределение толщины слоя напыленного на подложку материала является центрально-симметричным и описывается одной переменной – расстоянием до центра подложки. Данная модель также основана на законе косинусов Ламберта-Кнудсена и, в дополнение к опубликованным ранее работам, содержит в качестве коэффициента пропорциональности скорость распыления напыляемого материала.

Дальнейшие исследования разнотолщинности тонкопленочных покрытий сводятся, в основном, к проблематике измерений локальной толщины пленок. В частности, для исследования тонкопленочных электродов разработан новый резистометрический метод [10]. Результаты подобных работ свидетельствуют о перспективности именно магнетронного способа получения тонкопленочных покрытий. Так, в работе [11] показано, что магнетронное напыление обеспечивает минимальную разнотолщинность электродов из молибдена по сравнению с другими методами получения покрытий, в частности, с методом термического испарения в вакууме.

Необходимо отметить, что типовые конструкции установок магнетронного напыления, как правило, не соответствуют рассмотренной в работе [9] расчетной модели. Рассмотрим вкратце наиболее распространенные варианты конструкций таких установок. Для оценки возможностей технологического оборудования по обеспечению максимально достижимой равномерности толщины формируемых тонкопленочных покрытий при магнетронном распылении, схемы конструктивного устройства этих вакуумных установок будем анализировать в соответствии с указанными выше факторами – причинами разнотолщинности покрытий.

Например, магнетронная установка «Луч-013» производства ФГУП НИИ НПО "Луч" содержит два магнетрона круглой формы, оси которых расположены соответственно горизонтально и вертикально. Подложку укладывают напыляемой поверхностью вверх в нижней части вакуумной камеры. Очевидно, что равномерность толщины наносимого покрытия при такой схеме обеспечена быть не может (несмотря на наличие в нижней части камеры вращающейся платформы, на которую и укладывают подложку).

Необходимо отметить, что конструкция именно этой установки полностью соответствует рассмотренной в работе [9] расчетной схеме и то лишь в случае, когда для напыления используется магнетрон с вертикальной осью, а подложка неподвижна.

Примерно аналогична схема конструктивного устройства вакуумной установки для нанесения металлических и диэлектрических нанопленок модели "МАГНА ТМ-200-01" производства НИИТМ [12]. Для повышения равномерности наносимых покрытий конструкция этой установки предусматривает применение мультикатодного магнетронного распылительного устройства, представляющего собой три магнетрона круглой формы, располагаемых в едином корпусе таким образом, что их оси образуют друг с другом пространственные углы. При этом магнетронам придают вращение относительно центральной оси единого корпуса. Такая схема напыления существенно повышает равномерность толщины наносимого покрытия. Другим достоинством конструкции этой установки является то, что подложки располагаются напыляемой поверхностью вниз в верхней части камеры. Такое расположение подложки предпочтительнее расположения подложки напыляемой поверхностью вверх, поскольку в последнем случае покрытие характеризуется повышенной загрязненностью.

Другой способ повышения равномерности толщины покрытия на подложке реализован в конструкции установки «Caroline D 12A1» производства фирмы «ЭСТО-

Вакуум» [13]. Здесь так же, как и в предыдущем случае, подложки расположены напыляемой поверхностью вниз в верхней части камеры. Особенностью конструкции является то, что групповой подложкодержатель совершает вращательное движение вокруг оси, расположенной на значительном расстоянии от магнетрона. Таким образом, подложка движется по окружности, радиус которой намного больше размера магнетрона. Сам магнетрон может быть при этом как круглой, так и продолговатой формы.

Наибольшую равномерность толщины покрытия, по нашему мнению, обеспечивает схема конструктивного устройства, реализованная в установках производства фирмы «Leybold Optics», предназначенных для получения прецизионных оптических покрытий. Здесь магнетрон расположен в нижней части камеры, а подложки размещают в верхней части (под куполом) камеры напыляемой поверхностью вниз в подложкодержателях планетарно-купольного типа с двойным пространственным вращением подложек. Эти установки применяют для нанесения на оптические детали многослойных – с числом слоев до трехсот – оптических покрытий. Кинематическая сложность подобных установок для нанесения покрытий, характерных для точного приборостроения, представляется избыточной.

В качестве базового будем рассматривать конструктивное устройство установки с дуальным магнетронным распылением, снабженной механизмом карусели для обеспечения планетарного движения подложки. Напыляемая поверхность подложки расположена вертикально [14, 15]. Достоинствами такой схемы работы оборудования является то, что вертикальное расположение напыляемой поверхности минимизирует загрязнения осаждаемой пленки. В то же время, наличие механизма планетарного вращения позволяет варьировать кинематические факторы процесса.

Таким образом, мы можем указать место нашей статьи среди предшествующих работ. Как можно видеть из краткого обзора предшествующих работ, построение математических моделей, описывающих формирование разнотолщинности тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении, до настоящего времени ограничивается рассмотрением неподвижного расположения подложки и испарителя. В то же время развитие конструкций установок магнетронного напыления характеризуется приданием подложке сложного движения в пространстве вакуумной камеры. Применительно к деталям прецизионного приборостроения наиболее адекватной представляется кинематика планетарного перемещения подложки в плоскости, перпендикулярной к плоскости мишени. Место нашей статьи – в дальнейшем развитии и расширении математических моделей, описывающих формирование разнотолщинности покрытия при магнетронном напылении применительно к планетарному движению подложки в процессе напыления.

Цель работы - нахождение решения задачи расчета ожидаемой формы распределения толщины тонкопленочного покрытия по поверхности подложки, совершающей планетарное перемещение в плоскости, перпендикулярной к плоскостям распыляемых с применением магнетронов мишеней.

Поставленная цель достигается в два следующих этапа.

1) Разработка математической модели скорости роста толщины покрытия в рассматриваемой точке подложки, учитывающей закономерности перемещения подложки относительно магнетрона.

2) Разработка методики и последовательности расчета распределения сформированной толщины покрытия по подлежащей напылению поверхности заготовки. Следует учесть одновременную работу нескольких испарителей и периодический поворот подложки к испарителям тыльной стороной.

Научная новизна выполненной работы заключается в том, что впервые получены зависимости определяющих скорость роста тонкопленочного покрытия параметров от факторов, характеризующих кинематику перемещения подложки в пространстве вакуумной камеры. В качестве указанных параметров рассмотрены: расстояние от рассматриваемой точки на поверхности подложки до испарителя, угол направленности от испарителя на рассматриваемую точку подложки и угол падения напыляемого материала из испарителя в рассматриваемую точку подложки. В качестве факторов исследованы: соотношения частот собственного и переносного вращения подложки, радиуса водила планетарного механизма и радиуса окружности крепления подложки на сателлите планетарного механизма, расположения центра планетарного механизма относительно плоскости и активных зон магнетрона.

Анализ кинематики установки напыления при формировании тонкопленочного покрытия

Схема вакуумной установки представлена на рис. 1.

Покрытие на деталь наносят с двух одинаковых магнетронов, расположенных симметрично относительно вертикальной (сагиттальной) плоскости. Свяжем с водилом карусели вакуумной установки систему координат XOY, которая совершает вращательное движение с частотой $n_в$ вокруг точки O. С сателлитом планетарного механизма свяжем систему координат xoy, расположенную на расстоянии R от точки O и совершающую вращательное движение с частотой n_C вокруг точки o. Деталь располагается параллельно оси ox на расстоянии r от неё. Распыляемая поверхность магнетрона расположена под углом θ к фронтальной плоскости на расстоянии D от оси вращения карусели. С источником распыления напыляемого материала, расположенным в точке Ω, свяжем систему координат $\chi\Omega\eta$. Эта точка располагается на расстоянии χ_Ω от оси симметрии вакуумной камеры вдоль оси $\Omega\chi$, соответствующей плоскости мишени.

Принимая во внимание наработки, отраженные в имеющейся литературе [7 - 9], будем предполагать, что в произвольной точке A поверхности детали скорость ξ роста толщины покрытия определяется величиной

$$\xi = k \cdot \frac{h_m}{\rho^2} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\varepsilon \,, \qquad (1)$$

где

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров частиц напыляемого материала и стехиометрии формируемого покрытия, $^{мкм \cdot мм^2}/_{частицу}$;

h_m – максимум диаграммы направленности распыления, $^{частиц}/_{с}$;

ρ – расстояние от рассматриваемой точки A на поверхности детали до точки на распыляемой поверхности мишени, *мм*;

φ – угол направленности, соответствующий рассматриваемой точке A (в литературе [7] он назван углом распыления);

ε – угол падения для точки A (или, что то же самое, угол конденсации [7]).

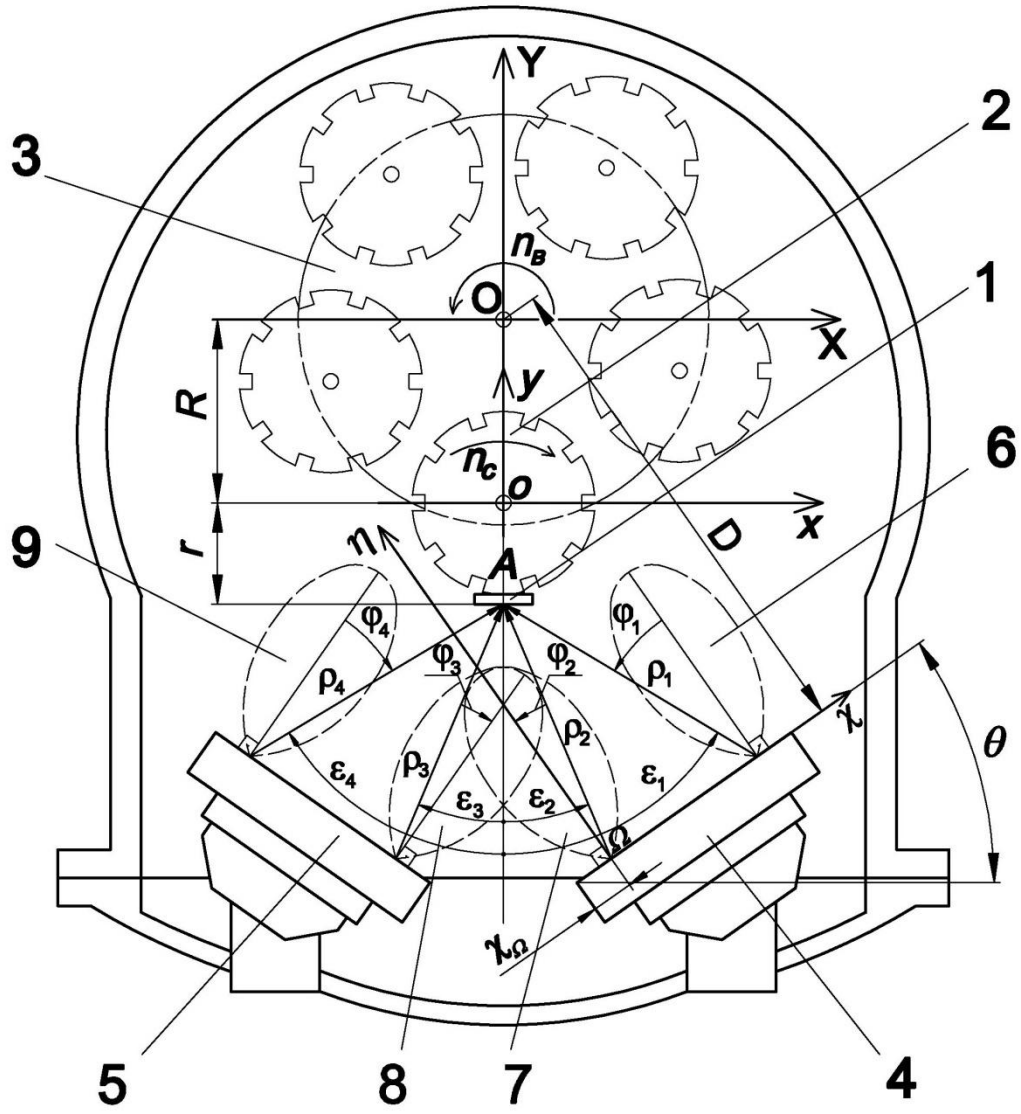


Рис. 1. Схема вакуумной установки ионно-плазменного напыления с магнетронным распылением мишеней: 1 – деталь, содержащая напыляемую поверхность; 2, 3 – сателлит и водило планетарного механизма карусели; 4, 5 – правый и левый магнетроны; 6, 7 и 8, 9 – диаграммы направленности источников напыляемого материала из мишеней правого и левого магнетронов

Для определения скорости роста толщины покрытия в точке A необходимо рассчитать величины ρ, φ и ε, входящие в формулу (1). Предлагаемая методика расчета поясняется схемой, представленной на рис. 2 и заключается в том, что отыскивается положение точки A на напыляемой поверхности детали в системе координат $\chi\Omega\eta$, связанной с источником напыляемого материала. При этом ось $\Omega\chi$ – это плоскость мишени (источника напыляемого материала), а Ω – точка выхода напыляемого материала из мишени. Можно видеть, что плоскость $\Omega\chi$ наклонена под углом θ, а точка Ω находится на расстоянии χ_Ω от оси симметрии камеры.

Напыляемая плоскость детали представлена линией ACK. Эта плоскость перпендикулярна радиус-вектору $\overline{o}\overline{C} = \vec{r}$. Радиус-вектор $\overline{o}\overline{C}$ поворачивается вокруг точки o, которая является началом системы координат xoy. В рассматриваемом положении система координат xoy повернулась по часовой стрелке вокруг точки o на угол β. Сама точка o находится на радиус-векторе $\overline{O}\overline{o}$, с которым связана система координат XOY, которая вращается вокруг точки O. В рассматриваемом положении система координат XOY повернулась вокруг точки O на угол α против часовой стрелки.

Между углами и существует прямо пропорциональная связь:

$$\beta = n\alpha \ . \quad (2)$$

Задача заключается в нахождении расстояния $\Omega A = \rho$ и решается в параметрической форме. Параметр - угол поворота детали β.

Искомое расстояние $\Omega A = \rho$ определяется по формуле

$$\rho = \sqrt{\chi_A{}^2 + \eta_A{}^2}, \quad (3)$$

где χ_A, η_A – проекции вектора $\overline{\Omega}\overline{A}$ на оси координат $\Omega\chi$ и $\Omega\eta$ соответственно.

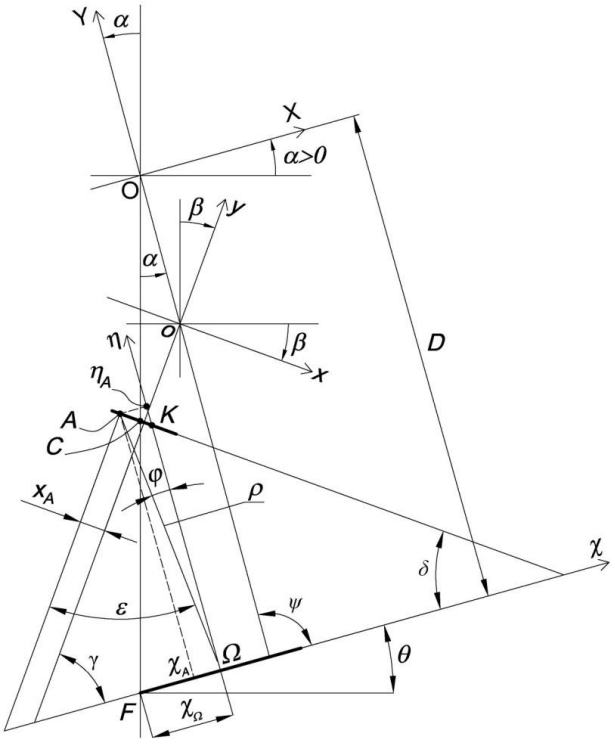
Из рассмотрения схемы можно видеть, что вектор $\overline{\Omega}\overline{A}$ представляет собой сумму следующих векторов:

$$\overline{\rho} = \overline{\Omega}\overline{A} = \overline{\Omega}\overline{F} + \overline{F}\overline{O} + \overline{O}\overline{o} + \overline{o}\overline{C} + \overline{C}\overline{A} \ . \quad (4)$$

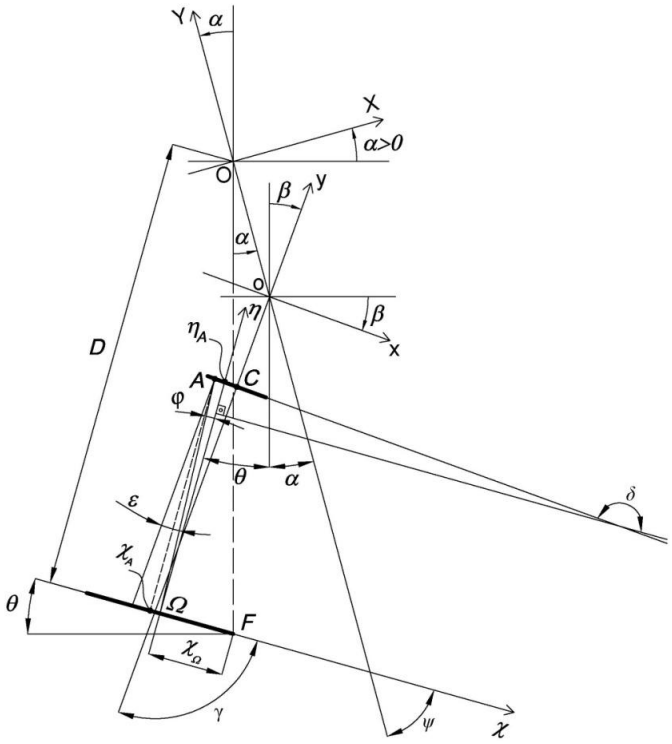
Тогда проекции χ_A и η_A вектора $\overline{\Omega}\overline{A}$ на оси $\Omega\chi$ и $\Omega\eta$ могут быть вычислены как суммы проекций складываемых векторов, т.е.

$$\begin{aligned} \chi_A &= -\chi_\Omega + FO\cos\left(90^0 - \theta\right) - Oo\cos\psi - oC\cos\gamma - CA\cos\delta; \\ \eta_A &= FO\cos\theta - Oo\sin\psi - oC\sin\gamma - CA\sin\delta \end{aligned}, \quad (5)$$

где ψ, γ, δ – углы, указанные на схеме, приведенной на рис. 2, *б*.



а



б

Рис. 2. Схема для расчета геометрических и кинематических параметров процесса напыления при вращении механизма карусели в прямом направлении для правого (*а*) и левого (*б*) магнетронов

Для системы уравнений (5) величину χ_Ω считаем заданной. Также считаем заданными величины $oO = R$, $oC = r$. Величина FO может быть рассчитана по формуле

$$FO = \frac{D}{\cos\theta}, \tag{6}$$

где D – расстояние между осью вращения карусели (точка O) и плоскостью мишени – источника напыляемого материала (ось $\Omega\chi$). Это расстояние также считаем заданным.

Переменные величины, входящие в систему уравнений (5), на основании рассмотрения расчетной схемы (рис. 2, *б*) могут быть определены по формулам

$$\psi = 180^0 - \theta - \left(90^0 - \alpha\right) = 90^0 - \left(\theta + \alpha\right) = 90^0 - \left(\theta + \frac{\beta}{n}\right), \tag{7}$$

$$\gamma = 180^0 - \theta - \left(90^0 + \beta\right) = 90^0 - \left(\theta + \beta\right), \tag{8}$$

$$\delta = 90^0 - \gamma = 90^0 - \left[90^0 - \left(\theta + \beta\right)\right] = \theta + \beta, \tag{9}$$

$$CA = x_A, \tag{10}$$

где x_A – координата рассматриваемой точки A в системе координат xoy, связанной с сателлитом планетарного механизма.

Подставляя заданные и преобразованные при помощи выражений (6)–(10) величины в исходную систему уравнений (5), получаем

$$\begin{aligned} \chi_A &= -\chi_\Omega + \frac{D}{\cos\theta}\sin\theta - R\sin\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r\sin\left(\theta + \beta\right) - x_A\cos\left(\theta + \beta\right); \\ \eta_A &= D - R\cos\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r\cos\left(\theta + \beta\right) - x_A\sin\left(\theta + \beta\right). \end{aligned} \tag{11}$$

Система уравнений (11) описывает координаты точки A в системе координат $\chi\Omega\eta$ в параметрическом виде: задавая значения параметру β , можно рассчитать координаты χ_A , η_A .

Далее, по формуле (3) определяется радиус – вектор ρ точки A в текущем положении напыляемой поверхности детали относительно источника напыляемого материала.

Имея координаты χ_A , η_A , можно определить показанный на расчетной схеме (рис. 2, *б*) угол направленности φ эмиссии напыляемого материала из точечного источника (точки Ω) в рассматриваемую точку A на напыляемой поверхности детали как

$$\varphi = arctg\frac{\chi_A}{\eta_A}. \tag{12}$$

Наконец, анализируя эту же расчетную схему, можно вывести формулу для определения угла падения ε частиц напыляемого материала из точки их эмиссии с поверхности мишени Ω в рассматриваемую точку A на поверхности детали:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 90^0 - \left[180^0 - \delta - \left(90^0 - \varphi\right)\right] = 90^0 - \left[180^0 - \left(\theta + \beta\right) - \left(90^0 - \varphi\right)\right] = \\ &= 90^0 - \left[90^0 - \left(\theta + \beta - \varphi\right)\right] = \theta + \beta - \varphi = \theta + \beta - arctg\frac{\chi_A}{\eta_A}.\end{aligned} \tag{13}$$

Формулы (11)–(13) получены для правого (рис. 1) источника напыляемого материала, причем для случая, когда карусель (система координат XOY) вращается против часовой стрелки, а сателлит планетарного механизма (система координат xoy) вращается по часовой стрелке. При других вариантах рассматриваемой мишени и направлений вращения формулы (11) , (13) несколько видоизменяются.

Для левой мишени при том же направлении вращений (карусель – против, а сателлит – по часовой стрелке) формулы (11) , (13) приобретают вид

$$\begin{aligned}\chi_A &= \chi_\Omega - Dtg\,\theta + R\sin\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) + r\sin\left(\theta - \beta\right) - x_A\cos\left(\theta - \beta\right); \\ \eta_A &= D - R\cos\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r\cos\left(\theta - \beta\right) + x_A\sin\left(\theta - \beta\right),\end{aligned} \tag{14}$$

$$\varepsilon = \beta - \theta - \varphi = \beta - \theta - arctg\frac{\chi_A}{\eta_A}. \tag{15}$$

На рис. 3 приведена расчетная схема, соответствующая рассмотрению реверсивного движения механизма перемещения заготовки, т.е. карусель вращается по часовой стрелке, а сателлит планетарного механизма – против. В этом случае имеют место следующие преобразования уравнений (11) , (13).

Для левой мишени:

$$\begin{aligned}\chi_A &= \chi_\Omega - Dtg\,\theta + R\sin\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r\sin\left(\beta - \theta\right) - x_A\cos\left(\beta - \theta\right); \\ \eta_A &= D - R\cos\left(\theta + \frac{\beta}{n}\right) - r\cos\left(\beta - \theta\right) + x_A\sin\left(\beta - \theta\right),\end{aligned} \tag{16}$$

$$\varepsilon = \varphi - \beta + \theta = arctg\frac{\chi_A}{\eta_A} - \beta + \theta; \tag{17}$$

Для правой мишени:

$$\begin{aligned}\chi_A &= -\chi_\Omega + Dtg\,\theta - R\sin\left(\theta - \frac{\beta}{n}\right) - r\sin\left(\theta + \beta\right) - x_A\cos\left(\theta + \beta\right); \\ \eta_A &= D - R\cos\left(\theta - \frac{\beta}{n}\right) - r\cos\left(\theta + \beta\right) - x_A\sin\left(\theta + \beta\right),\end{aligned} \tag{18}$$

$$\varepsilon = |\beta| - \theta - |\varphi| = |\beta| - \theta - \left| arctg \frac{\chi_A}{\eta_A} \right|. \qquad (19)$$

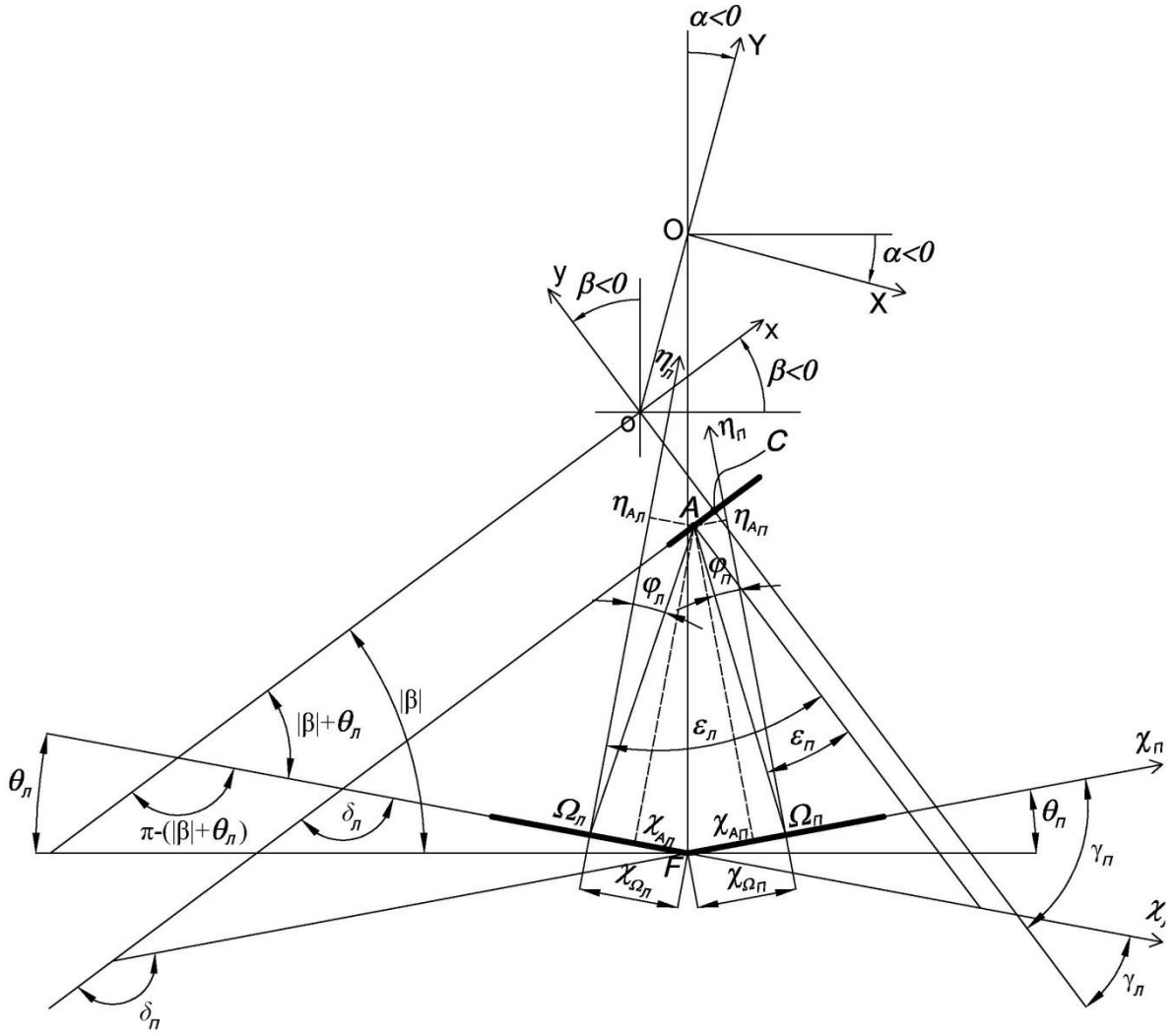


Рис. 3. Схема для расчета геометрических и кинематических параметров процесса напыления при реверсном вращении механизма карусели для левого и правого магнетронов

В качестве примера на рис. 4 приведены кинематические зависимости геометрических параметров, рассчитываемых по формулам (11) – (19) для одной точки поверхности детали с координатой x_A = 20 мм, при рассмотрении одного точечного источника напыляемого материала, расположенного на правой мишени (рис. 1) на расстоянии χ_Ω = 138 мм от оси симметрии установки.

Значения остальных параметров для расчета были приняты следующими: расстояние от центра вращения карусели до плоскости мишени D = 278 мм; угол наклона мишени θ = 23^0; радиус расположения деталей на сателлите планетарного механизма r = 37 мм; радиус водила планетарного механизма R = 145 мм; соотношение между частотами вращения

сателлита и карусели $n = 5$; направление вращения сателлита относительно направления вращения карусели – встречное.

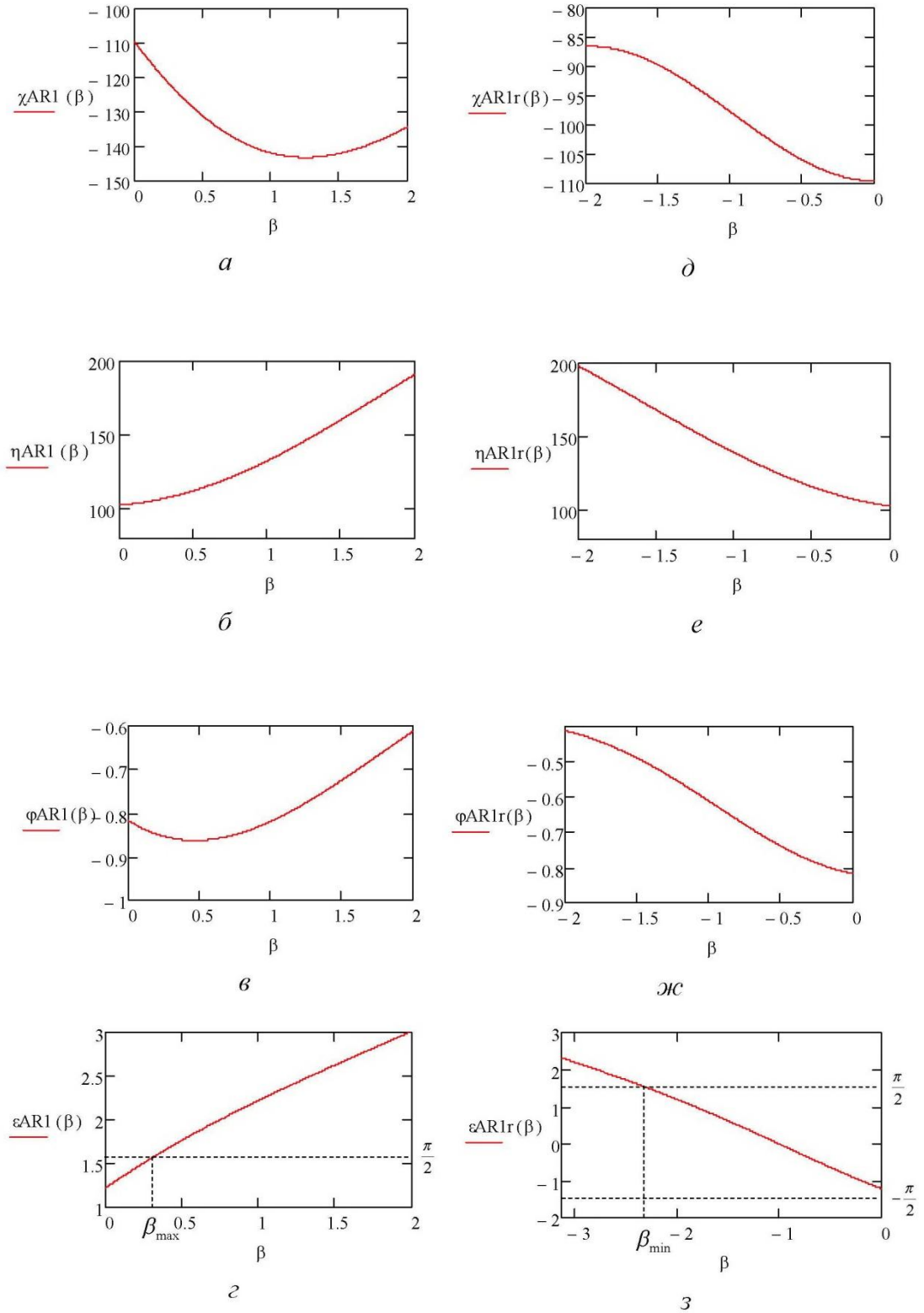


Рис. 4. Зависимости координат χ (*а*, *д*) и η (*б*, *е*), а также угла направленности φ (*в*, *ж*) и угла падения ε (*г*, *з*) в единичной точке поверхности детали в процессе напыления из единичного точечного источника напыляемого материала от угла поворота несущего деталь сателлита планетарного механизма β при вращении сателлита по (*а*, *б*, *в*, *г*) и против (*д*, *е*, *ж*, *з*) часовой стрелки

На рис. 4 приведены расчетные зависимости координат χ , η, а также угла направленности φ и угла падения ε для рассматриваемой точки A на поверхности детали от угла поворота сателлита β при вращении сателлита по (рис. 4, *а*, *б*, *в*, *г*) и против часовой стрелки (рис. 4, *д*, *е*, *ж*, *з*). Сопоставление полученных кривых с особенностями формирования расчетных величин, которые поясняются схемами на рис. 1–3, позволяет оценить полученные графики как адекватные.

Особое внимание следует уделить рассмотрению особенностей кинематических зависимостей для параметра ε – угла падения напыляемого материала из единичного источника в рассматриваемую точку на поверхности детали (рис. 4, *г*, *з*). Процесс напыления на рассматриваемую поверхность детали в рассматриваемой точке возможен лишь при выполнении условия $|\varepsilon| < \frac{\pi}{2}$. Исходя из этого, можно получить наибольшее $\beta_{\max}$ (рис. 4, *г*) и наименьшее $\beta_{\min}$ (рис. 4, *з*) значения углов поворота β, таких, что процесс напыления в рассматриваемую точку из рассматриваемого точечного источника происходит лишь при выполнении условия $\beta_{\min} < \beta < \beta_{\max}$. Здесь величины углов β учитываются со своими знаками: положительным значениям β соответствует поворот сателлита по часовой стрелке, а отрицательным – против.

Расчет неравномерности толщины слоя при напылении тонкопленочного покрытия

Основой для расчета распределения толщины покрытия по поверхности детали является формула (1), которая устанавливает зависимость скорости ξ роста толщины покрытия в некоторой фиксированной точке A поверхности детали от геометрических параметров, характеризующих текущее положение технологической системы: расстояние ρ от рассматриваемой точки A до точечного источника напыляемого материала; угол направленности φ от точечного источника в точку A; угол падения ε напыляемого материала в точку A из точечного источника. На рис. 5 приведены зависимости скорости роста ξ толщины тонкопленочного покрытия в точке A на поверхности детали от угла поворота β сателлита планетарного механизма при рассмотрении одного точечного источника напыляемого материала. Исходные данные для расчета – те же, что и в примере, рассмотренном выше, результаты которого представлены на рис. 4.

Из результатов расчета для случая поворота сателлита планетарного механизма по часовой стрелке (рис. 5, *а*) можно видеть, что, как было показано выше (рис. 4, *г*), напыление в точке A происходит лишь тогда, когда угол поворота β сателлита находится в пределах от 0 до $\beta_{\max}$.

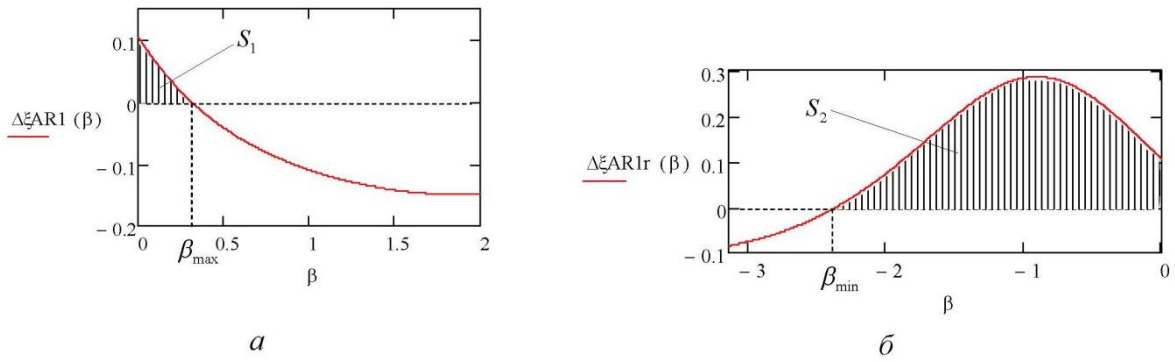


Рис. 5. Зависимости скорости роста толщины пленки ξ в рассматриваемой точке от угла поворота сателлита β при напылении из точечного источника, расположенного на правой мишени при вращении механизма карусели в прямом (*а*) и реверсном (*б*) направлениях

На рис. 5, *а* о протекании процесса напыления свидетельствует тот факт, что при $0 < \beta < \beta_{max}$ оказывается, что $\xi > 0$. Далее, при $\beta > \beta_{max}$ расчетная величина ξ отрицательна, что не имеет физического смысла и указывает на то, что в этом случае деталь повернулась к точечному источнику тыльной стороной, и напыления материала в точке *A* не происходит.

Аналогично, рассматривая результаты расчета для случая поворота сателлита планетарного механизма против часовой стрелки (рис. 5, *б*), замечаем, что процесс напыления в точка *A* происходит только при изменении угла поворота β сателлита от 0 до β_{min}. При этом величина β_{min} совпадает с полученной ранее (рис. 4, *з*), а на отрезке [β_{min} , 0] имеем $\xi > 0$. Так же как и в предыдущем случае, видно, что при отрицательных значениях расчетной величины ξ деталь поворачивается к источнику напыления тыльной стороной, и напыления в точку *A* не происходит.

Переходя от рассмотрения скорости напыления ξ к расчету непосредственно толщины *H* напыляемого материала в рассматриваемой точке *A*, отметим, что величина *H* может быть определена интегрированием зависимостей $\xi(\beta)$ по β. Для удобства расчета заменим непрерывное планетарное движение сателлита, обеспечиваемое механизмом карусели установки магнетронного напыления, при котором собственно карусель вращается против часовой стрелки, а сателлит – по часовой стрелке, двумя планетарными движениями: 1) от нулевого положения до поворота сателлита на угол β_{max}; 2) от нулевого положения реверсом до поворота сателлита на угол β_{min}.

Тогда для рассматриваемой единичной точки *A* на поверхности детали толщина покрытия, формируемая рассматриваемым единичным источником напыляемого материала, будет соответствовать сумме двух площадей – S_1 (рис. 5, а) и S_2 (рис. 5, б).

Переходя к анализу технологической системы напыления в целом, следует заметить, что толщина тонкопленочного покрытия в каждой единичной рассматриваемой точке *A* формируется из четырех точечных источников напыляемого материала – по два на

мишенях, расположенных на левом и правом магнетронах. Поэтому толщина покрытия в единичной точке детали за каждый проход напыляемой поверхности через зону эмиссии напыляемого материала в неэкранированном относительно магнетронов состоянии соответствует сумме восьми площадей, аналогичных площадям S_1 и S_2, представленным на рис. 5. Эти суммы могут быть рассчитаны для каждой точки на напыляемой поверхности детали.

Для построения эпюры распределения толщины тонкопленочного покрытия по напыляемой поверхности детали разработана компьютерная программа расчета, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 6.

В начале расчета производят ввод исходных данных (блок 1 на рис.6). Здесь величинами x_{min} , x_{max} можно задавать размеры подложки. Кроме того задается количество отрезков m, на которые разбивается напыляемая поверхность детали при расчетах. Точность расчета может регулироваться при помощи задаваемой дискреты угла поворота сателлита планетарного механизма вокруг собственной оси $\Delta\beta$. Коэффициентами k и h_m, задают напыляемый материал и режим напыления.

Алгоритм заключается в выполнении цикла (блок 4) – перебора координат x_{Ai} с выводом (блок 8) эпюры-результата вычислений распределения толщины пленки H в виде графика $H_{Ai}= f(x_{Ai})$. Для этого в начале расчета формируют массив координат единичных расчетных точек x_{Ai} (блоки 2, 3, 5, 22, 24).

Построение искомой эпюры заключается в многократном вычислении величин χ, η, ρ, φ, ε (блоки 6, 10, 13, 16, 25, 28, 31, 34) при вращении механизма карусели в прямом и реверсном направлении.

Угол падения ε частиц напыляемого материала на напыляемую поверхность детали по абсолютной величине при вычислениях не должен превышать прямого угла (блоки 7, 11, 14, 17, 26, 29, 32, 35).

Сущность расчета толщины покрытия в точке A_i заключается в накапливании приращений толщины покрытия рекуррентным суммированием $H_{Ai} = H_{Ai} + \Delta H_{Ai}$, что и является вычислительным содержанием блоков 9, 12 , 15, 18, 21, а также 23, 27, 30 , 33, 36. Блоки 19, 20, 37, 38 предназначены для прерывания цикла вычислений.

На рис. 7 приведена эпюра распределения толщины тонкопленочного покрытия, полученная при помощи специально разработанной компьютерной программы, реализующей описанный алгоритм.

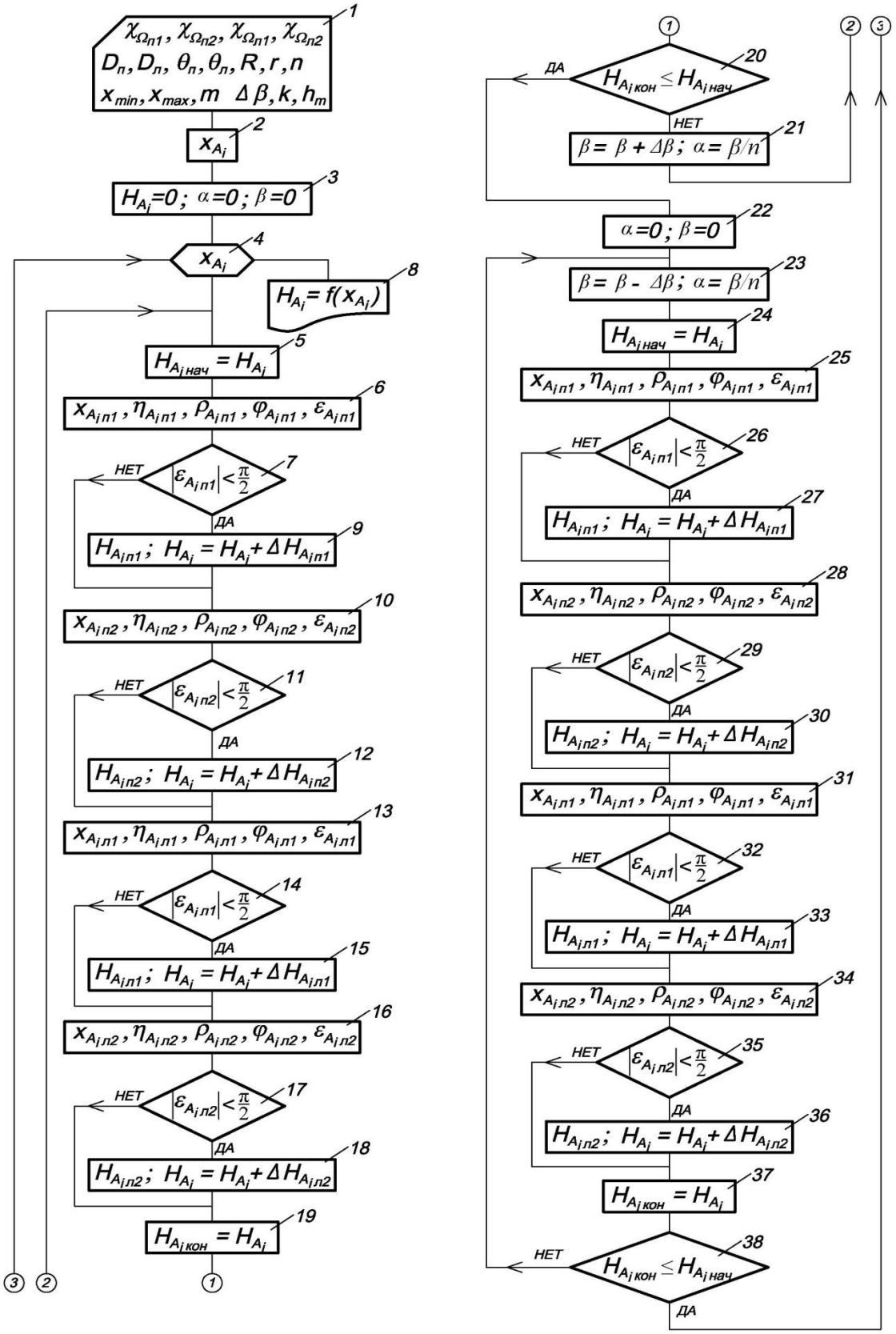


Рис. 6. Блок-схема алгоритма вычисления распределения толщины тонкопленочного покрытия по напыляемой поверхности детали

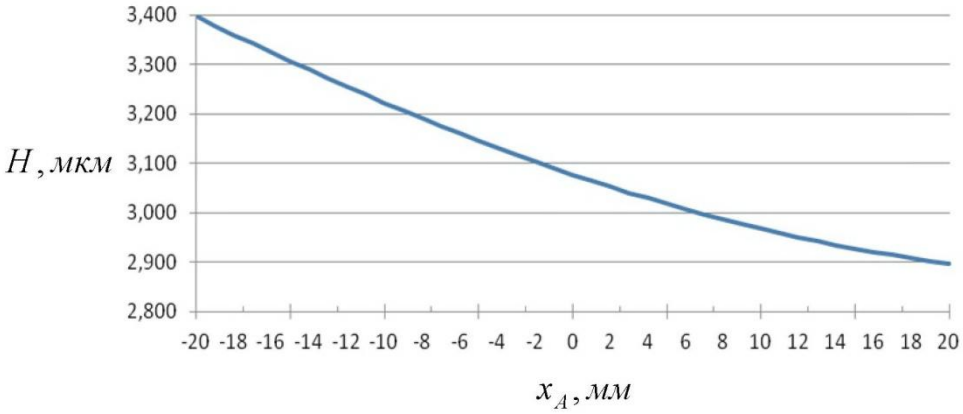


Рис. 7. Расчетное распределение толщины тонкопленочного покрытия по напыляемой поверхности детали

Можно видеть, что наибольшие и наименьшие расчетные толщины покрытия в различных точках напыляемой поверхности могут различаться по величине на 15 – 20%. Необходимо отметить, что влияние не учитываемых нашей математической моделью факторов процесса напыления может приводить к некоторому снижению разнотолщинности сформированного покрытия.

Заключение

На основе проведенных аналитических исследований можно сделать следующие выводы.

1) Разработана методика расчета ожидаемого распределения толщины тонкопленочного покрытия по напыляемой поверхности при магнетронном распылении мишеней на установках с планетарным механизмом перемещения детали. Методика основана на расчете скорости увеличения толщины покрытия в единичных точках напыляемой поверхности за цикл планетарного перемещения детали. Разработанная методика позволяет научно обосновывать конструкторские решения, принимаемые как при проектировании механизма карусели магнетронных установок планетарного типа, так и при проектировании технологической оснастки для крепления на механизме карусели деталей с различной геометрией напыляемой поверхности.

2) Разработаны математические модели, устанавливающие зависимости скорости роста тонкопленочного покрытия в единичных точках напыляемой поверхности детали от изменяющихся в процессе напыления геометрических и кинематических параметров. Модели основаны на вычислении расстояний от точки на поверхности детали до источников напыляемого материала, а также углов эмиссии материала с мишеней и углов конденсации материала в точках напыляемой поверхности. Вычисляемые по этим моделям скорости роста толщины покрытия в единичных точках лежат в основе разработанной методики расчета ожидаемого распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности и позволяют рассматривать любые разновидности планетарного

движения детали в плоскости, перпендикулярной к рассматриваемой плоской напыляемой поверхности.

Работа выполнена в МГТУ имени Н.Э. Баумана. Полученные результаты применяются на филиале ФГУП «ЦЭНКИ»-«НИИ ПМ имени В.И. Кузнецова».

Список литературы

1. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонко-пленочной технологии. М.: Изд-во «Техносфера», 2010. С. 457-488.
2. Коновалов С.Ф., Пономарев Ю.А., Майоров Д.В., Подчезерцев В.П., Сидоров А.Г. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/219257.html (дата обращения 01.10.2014) .
3. Богданович В.И., Барвинок В.А., Кирилин А.Н. Тонкопленочные электронагреватели с наноструктурным резистивным слоем для терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 3. С. 111-117 .
4. Odinokov S.B., Sagatelyan H.R. The design and manufacturing of diffraction optical elements to form a dot-composed etalon image within the optical systems // Optics and Photonics Journal. 2013. Vol. 3, no. 1. P. 102-111. DOI: 10.4236/opj.2013.31017
5. Сагателян Г.Р., Новоселов К.Л., Шишлов А.В., Щукин С.А. Совершенствование технологического процесса изготовления пластины маятникового акселерометра // Естественные и технические науки. 2012. № 6. С. 369-376.
6. Савуков В.В. Уточнение аксиоматических принципов статистической физики (теоретическое обоснование поискового проекта “Pitch Fleck”). СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2010. С. 36-42.
7. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. С. 88-89.
8. Костржицкий А.И., Карпов В.Ф., Кабанченко М.П., Соловьева О.Н. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. С. 98-104.
9. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: Моделирование в среде MathCAD. Практикум / под ред. Г.Д. Кузнецова. М.: МИСИС, 2001. 48 с.
10. Мансуров Г.Н., Петрий О.А. Электрохимия тонких металлических пленок: монография. М.: МГОУ, 2011. 351 с.
11. Беляев С.Н. Технологические особенности выбора материалов и методов напыления узлов гироприборов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 3. С. 73-79.

12. Одиноков В.В., Павлов Г.Я. Вакуумная установка магнетронного нанесения металлических и диэлектрических нанопленок «Магна ТМ-200-01» // Наноиндустрия. 2008. № 4. С. 10-12.
13. Берлин Е.В., Двинин С.А., Сейдман Л.А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М.: Техносфера, 2007. 176 с.
14. Агабеков Ю.В., Сутырин А.М. Несбалансированные магнетронные распылительные системы с усиленной ионизацией плазмы // Постоянно действующий научно-технический семинар “Электровакуумная техника и технология”: тр. Т. 1. М., 1999. С. 102-108.
15. Федотов А.В., Агабеков Ю.А., Мачикин В.П. Многофункциональные нанокомпозитные покрытия // Наноиндустрия. 2008. № 1. С. 24-26.

.

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0448

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 11, pp. 458–481.

DOI: **10.7463/1114.0733662**

Received: 23.09.2014
Revised: 24.10.2014

© Bauman Moscow State Technical Unversity

The Analysis of Distribution of Thickness of Thin-Film Coating During the Magnetron Sputtering on Systems with Planetary Movement of Substrate

H.R. Sagatelyan[1,*], A.V. Shishlov[1]

*h_sagatelyan@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: Sputter deposition, magnetron sputtering, thin-film coating, thickness, unevenness, planetary gearing, evaporation rate

The article subject is a thin-film coating process using ion-plasma sputter deposition systems with magnetron sputtering targets. To improve coating thickness evenness of parts various manufacturers equip their systems with mechanisms for moving the coating parts, and sometimes the magnetrons. More specifically, the article concerns the ion-plasma sputtering process using a system equipped with a mechanism for providing a planetary movement of the coating parts in the plane perpendicular to the planes of two sputtering targets.

The purpose of this work was to improve a distribution of the coating thickness evenness on the sputtering surface of the part. It is achieved through selection of the best combinations of kinematic and geometric factors that characterize a particular sputtering operation, depending on the size and position of the surface to be coated. These factors include a ratio between directions and frequencies of the self-rotation of satellite planetary gear, which holds a work piece-substrate, and the translational motion i.e. planetary carrier rotation to carry the satellite; the angles of planes of the right and left magnetrons with respect to the system frontal plane. Since there is, essentially, a lack of mathematical models to perform the appropriate calculations for the considered type of system designs, a more specific aim of the article is to develop a technique to evaluate the uneven thickness of coatings provided by the systems of this type.

To achieve this more specific purpose the analytical technique had been used, applying the postulates of analytical geometry and theoretical mechanics.

The main results of the research described in the article are as follows:

- mathematical models of dependencies of geometric and kinematic parameters, changing during the sputtering process and characterizing each considered point on the surface of the work piece, on the current position of the work piece in the structure of the planetary gear;

- technique and algorithm for computing the thickness distribution of thin film coating on the substrate surface. The technique is based on the proposed model of the dependence of the coating thickness growth rate in each considered point on sputtered surface on the geometric and kinematic parameters, which characterize this point and are changed during the deposition.

As geometric and kinematic parameters characterizing each considered point on the work piece surface, the article considers parameters to be changed during the deposition process. These are: distances from the considered point to the point sources of sputtered material i.e. erosion zones on the magnetron targets; the angles of orientation from the point sources of sputtered material on a considered point on the surface of the work piece; the angles of incidence in the considered point on the work piece surface of sputtered material emitted from these point sources.

The proposed technique and algorithm of calculation of the coating thickness allow us to take into consideration only those sources for which the angle of incidence of sputtered material onto the covering surface in modulus is not more than 90°.

Compared with the other similar publications in the field concerned, the presented article offers a possibility to calculate the unevenness of thin-film coating for a new previously non-considered class of gadgetry mechanisms applied in magnetron sputtering systems.

Obtained results can find applications in microelectronics and precision instrument manufacturing to ensure functional coatings of equal thickness, as well as in optical coating technology. One more application should be noted i.e. the obtained results may be used in two-component coatings.

The suggested technique for calculating the thickness distribution of thin-film coatings allows us to extend the boundaries of technological capabilities of magnetron sputtering systems with a planetary gear for moving the substrate. The article can be recommended for engineers-technologists of instrumentation engineering enterprises using the sputtering installations. Future developments should be focused on experimental updating the numerical values of the technological coefficients used in the calculations of the coating thickness growth rate.

References

1. Berlin E.V., Seidman L.A. *Ionno-plazmennye protsessy v tonkoplenochnoi tekhnologii* [Ion-plasma processes in thin-film technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, pp. 457-488. (in Russian).
2. Konovalov S.F., Ponomarev Yu.A., Mayorov D.V., Podchezertsev V.P., Sidorov A.G. Hybrid microelectromechanical gyroscopes and acceleration gages. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 10. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/219257.html , accessed 01.10.2014. (in Russian).
3. Bogdanovich V.I., Barvinok V.A., Kirilin A.N. Thin-film electric heaters with nanostructured resistive layer for thermal regulation of spacecraft on-board equipment. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Engineering and Automation Problems*, 2010, no. 3, pp. 111-117. (in Russian).

4. Odinokov S.B., Sagatelyan H.R. The design and manufacturing of diffraction optical elements to form a dot-composed etalon image within the optical systems. *Optics and Photonics Journal*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 102-111. DOI: 10.4236/opj.2013.31017
5. Sagatelyan G.R., Novoselov K.L., Shishlov A.V., Shchukin S.A. Improvement of technological process of manufacturing of plates of pendulum accelerometer. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 6, pp. 369-376. (in Russian).
6. Savukov V.V. *Utochnenie aksiomaticheskikh printsipov statisticheskoy fiziki (teoreticheskoe obosnovanie poiskovogo proekta "Pitch Fleck")* [Clarification of axiomatic principles of statistical physics (theoretical justification of the search project "Pitch Fleck")]. St. Petersburg, Ustinov Baltic State Technical University "Voenmech" Publ., 2010, pp. 36-42. (in Russian).
7. Danilin B.S., Syrchin V.K. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* [Magnetron sputtering systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, pp. 88-89. (in Russian).
8. Kostrzhitskiy A.I., Karpov V.F., Kabanchenko M.P., Solov'eva O.N. *Spravochnik operatora ustanovok po naneseniyu pokrytiy v vakuume* [Operator manual vacuum coating facility]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, pp. 98-104. (in Russian).
9. Nikonenko V.A. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: Modelirovanie v srede MathCAD. Praktikum* [Mathematical modeling of technological processes: Modeling with MathCAD. Workshop]. Moscow, MISIS Publ., 2001. 48 p. (in Russian).
10. Mansurov G.N., Petriy O.A. *Elektrokhimiya tonkikh metallicheskikh plenok* [Electrochemistry of thin metal films]. Moscow, MGOU Publ., 2011. 351 p. (in Russian).
11. Belyaev S.N. Technological features of choice materials and sputtering methods for gyrodevices units. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 73-79. (in Russian).
12. Odinokov V.V., Pavlov G.Ya. Vakuumnaya ustanovka magnetronnogo naneseniya metallicheskikh i dielektricheskikh nanoplenok "Magna TM-200-01" [Vacuum machine for deposition of metal and dielectric nanofilms by magnetron sputtering "Magna TM-200-01"]. *Nanoindustriya*, 2008, no. 4, pp. 10-12. (in Russian).
13. Berlin E.V., Dvinin S.A., Seydman L.A. *Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya naneseniya i travleniya tonkikh plenok* [Vacuum technology and equipment for thin film deposition and etching]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 176 p. (in Russian).
14. Agabekov Yu.V., Sutyrin A.M. Unbalanced magnetron sputtering system with enhanced plasma ionization. *Postoyanno deystvuyushchiy nauchno-tekhnicheskiy seminar "Elektrovakuumnaya tekhnika i tekhnologiya": tr. T. 1* [Proc. of the continuously working sci-

entific and technical seminar “Electric vacuum engineering and technology”. Vol. 1]. Moscow, 1999, pp. 102-108. (in Russian).

15. Fedotov A.V., Agabekov Yu.A., Machikin V.P. Multifunctional nanocomposite coatings. *Nanoindustriya*, 2008, no. 1, pp. 24-26. (in Russian).