

Р. М. Киреев, И. И. Ягафаров

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрена проблема обеспечения точности деталей при ионно-плазменном нанесении покрытия. Построена модель нанесения покрытия, учитывающая вращение детали, адекватность которой подтверждена экспериментально. Построена зависимость точности покрытия от количества деталей их габаритов и характеристик оборудования. Точность; ионно-плазменная обработка; моделирование; нанесение покрытия TIN

ВВЕДЕНИЕ

Напыление покрытий ионно-плазменным методом широко применяется для повышения ресурса различных деталей, в том числе с высокими требованиями по точности размеров и относительного расположения поверхностей.

Имеется ряд работ [1, 2] по расчету параметров процесса (плотность тока, скорость нанесения и толщина покрытия) в различных точках вакуумной камеры. Однако в них не учитывается изменение положения детали в процессе обработки.

При обработке с применением вращения деталей и различном расположении деталей в камере относительно оси электродугового испарителя наблюдается неравномерность толщины покрытия в различных точках одной детали и на деталях одной садки. Это может привести к несоблюдению требований по точности предъявленных к деталям. В данной работе разработана модель, позволяющая рассчитывать толщину покрытия при вакуумной ионно-плазменной обработке с вращением деталей, имеющих различное положение относительно оси дугового источника плазмы, а также приведен алгоритм определения ориентировочного числа деталей в садке в зависимости от требуемой точности обработки и габаритов детали.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

За основу модели расчета взято уравнение для определения толщины слоя покрытия [3] в произвольной точке вакуумной камеры, согласно которого толщина h одного слоя покрытия определяется из выражения (1):

$$h = V_k \cdot t, \quad (1)$$

где V_k – скорость конденсации покрытия; t – время обработки.

Скорость конденсации покрытия определяется из соотношения (2):

$$V_k = \frac{m_i}{z \cdot e \cdot \rho} \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha_k j_{i,b} - s_p j_{i,b}), \quad (2)$$

где m_i – масса конденсирующегося иона; z – средний заряд иона; e – заряд электрона; ρ – удельная масса конденсирующегося вещества; α_k – коэффициент конденсации; $j_{i,b}$ – плотность ионного тока; s_p – коэффициент распыления.

При осаждении покрытий коэффициент распыления подложки будет стремиться к нулю, следовательно, им можно пренебречь, коэффициент конденсации при этом можно принять равным 1. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$V_k = \frac{m_i \cdot \alpha_k \cdot j_{i,b}}{z \cdot e \cdot \rho}. \quad (3)$$

Плотность ионного тока определяется по формуле (4):

$$j_{i,b} = \frac{\mu_p \cdot I_d \cdot z \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot m_i \cdot R_k^2} \times \left[1 + \frac{R_k^2 - l^2 - b^2}{\sqrt{(R_k^2 - l^2 - b^2)^2 - 4 \cdot R_k^2 \cdot b^2}} \right], \quad (4)$$

где μ_p – коэффициент эрозии катода; I_d – ток дуги на катоде; R_k – радиус катода; l – расстояние от торца катода; b – смещение относительно оси катода.

Представленная выше модель предназначена для определения толщины покрытия в произвольной, неподвижной точке вакуумного объема.

На основе приведенных выше данных разработана модель для расчета толщины и точности покрытия, наносимого ионно-плазменным методом с учетом изменения пространственного положения обрабатываемой поверхности относительно потока плазмы.

В модели введены следующие упрощения:

- учитывается только вращение деталей вокруг оси стола установки (планетарное вращение деталей не рассматривается);
- конденсация покрытия осуществляется при прохождении деталью участка 1–2–3 круговой траектории (рис. 1), исходя из того, что распределение потока частиц с катода принимает форму конуса, противоположные образующие (в плоскости рисунка) которого являются касательными к окружности радиуса стола;
- детали рассматриваются как плоские поверхности (толщина деталей не учитывается);
- считается, что детали закреплены симметрично относительно стержня установочного приспособления;
- считается, что эффект экранирования, связанный с большим количеством обрабатываемых деталей, отсутствует;
- износ катода в процессе обработки считается несущественным в масштабах решаемой задачи.

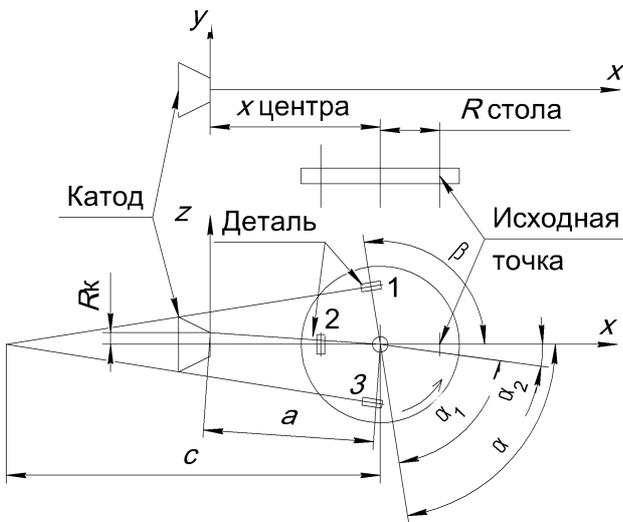


Рис. 1. Расчетная схема для определения области нанесения покрытия (обозначения в тексте)

Определение времени обработки за один цикл вращения стола

Для определения времени обработки за один оборот стола необходимо определить область нанесения покрытия и промежуток времени нахождения детали в этой области.

В соответствии с ограничениями модели, область нанесения покрытия определяется дугой, центральным углом которой является удвоенный угол от оси катода до центральной точки детали при ее входе в зону обработки (α).

Для упрощения расчета угла α в схему (рис. 1) введены вспомогательные величины (a , c , α_1 , α_2). Угол α определяется из следующих соотношений:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2;$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{R_k}{x_{\text{центра}}}\right),$$

где $x_{\text{центра}}$ – расстояние от торца катода до оси поворотного стола;

$$a = \frac{R_k}{\sin(\alpha_2)},$$

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{R_{\text{стола}}}{a}\right),$$

где $R_{\text{стола}}$ – радиус установочных отверстий поворотного стола;

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R_{\text{стола}} \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{R_k}{x_{\text{центра}}}\right)\right)}{R_k}\right) + \arctg\left(\frac{R_k}{x_{\text{центра}}}\right),$$

$$c = \frac{R_{\text{стола}}}{\cos(\alpha)}.$$

С целью определения времени обработки рассмотрим центральный угол дуги, описанной центром детали от исходной точки (β), который изменяется по следующему закону:

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot t,$$

где ω – угловая скорость вращения стола.

По схеме (рис.1) видно, что нанесение покрытия происходит в промежутке от $\beta = (\pi - \alpha)$ до $\beta = (\pi + \alpha)$, следовательно, конденсация покрытия за один оборот стола по описываемой модели происходит в промежутке времени

$$\left[\frac{\pi - \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \omega}; \frac{\pi + \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \omega}\right].$$

Определение скорости нанесения покрытия

При расчете скорости нанесения покрытия в определенной точке необходимо учесть угол наклона плоскости детали относительно потока плазмы (γ), для этого рассмотрим схему (рис. 2).

Для упрощения расчета угла γ в схеме введены вспомогательные величины (c, d, f).

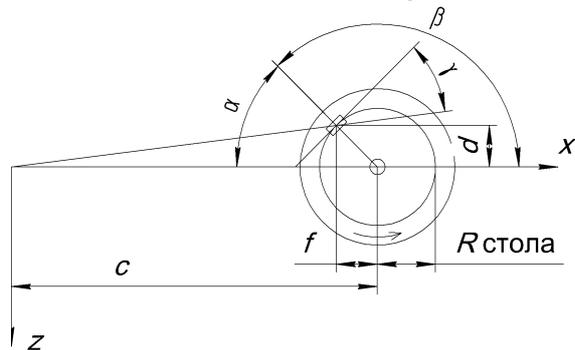


Рис. 2. Расчетная схема для определения скорости нанесения покрытия

Согласно схеме (рис. 2) определены следующие выражения:

$$\alpha = \pi - \beta; \quad f = R_{\text{стола}} \cos(\alpha); \quad d = R_{\text{стола}} \sin(\alpha); \quad (5)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{c-f}{d}\right) - \alpha; \quad \gamma = \arctg\left(\frac{c-f}{d}\right) - \alpha;$$

Формула (3) преобразуется к виду:

$$V_{\kappa} = \frac{m_i \cdot \alpha_{\kappa} \cdot j_{l,b}}{z \cdot e \cdot \rho} \cdot (\sin(\gamma)), \quad (6)$$

где γ – угол наклона плоскости детали относительно потока плазмы.

Определение толщины нанесенного слоя

Для определения толщины нанесенного слоя необходимо:

- проинтегрировать уравнение (1), с учетом (4), (5), (6) для промежутка времени

$$\left[\frac{\pi - \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \omega}; \frac{\pi + \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \right];$$

- полученную толщину слоя за один оборот стола необходимо помножить на количество оборотов, определяемое по формуле:

$$n = \omega \cdot t.$$

Определение погрешности толщины нанесенного покрытия

В общем виде погрешность толщины покрытия обработки в зависимости от расстояния от оси катода определяется следующим образом:

$$\Delta h = h_0 - h_y, \quad (7)$$

где h_0 – толщина покрытия в точке с нулевым смещением относительно оси катода, или в точке обрабатываемой детали с наименьшим сме-

щением от оси катода (наибольшая толщина покрытия при заданном расстоянии от торца катода); h_y – толщина покрытия в исследуемой точке.

Для определения точности покрытия в зависимости от количества деталей необходимо определить количество уровней позиционирования деталей в камере и рассчитать погрешность по формуле (7) для каждого уровня.

Определение количества уровней позиционирования вдоль вертикальной оси производится из технических характеристик установки (y_{max} – максимальное смещение относительно оси катода, на котором возможна установка детали в приспособлении), габаритов детали ($y_{\text{образца}}$) и необходимого технологического зазора ($z_{\text{технол}}$).

Определение количества деталей на одном уровне (вдоль горизонтальной оси позиционирования) производится исходя из технических характеристик установки (радиуса поворотного стола, количества установочных мест на поворотном столе), габаритов детали и необходимого технологического зазора (необходимого расстояния между деталями). Количество деталей определяется (с учетом теоремы Пифагора и теоремы синусов) из условия (рис. 3):

$$z_{\text{детали}} + \frac{z_{\text{технол}}}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{z_{\text{детали}}}{2 \cdot \sqrt{\frac{z_{\text{детали}}^2}{4} + R_{\text{стола}}^2}}\right)\right)} \leq m,$$

где $z_{\text{детали}}$ – ширина детали; $z_{\text{технол}}$ – технологический зазор; m – хорда окружности радиуса $R_{\text{стола}}$:

$$m = 2R_{\text{стола}} \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right),$$

где ε – угол между установочными местами приспособления;

$$\varepsilon = \frac{360}{n_{\text{уст}}},$$

где $n_{\text{уст}}$ – количество установочных отверстий на поворотном столе.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По приведенной выше модели разработаны алгоритмы расчета:

- толщины покрытия в точке камеры без смещения относительно оси катода (рис. 4);

- зависимости толщины конденсированного покрытия от смещения относительно оси катода с построением графика (рис. 5);
- зависимости погрешности покрытия от количества деталей с построением графика (рис. 6).

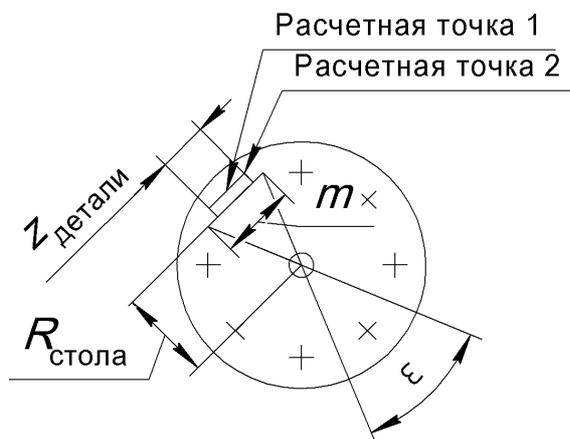


Рис. 3. Расчетная схема для определения количества деталей вдоль горизонтальной оси позиционирования (пояснения в тексте), за 1 расчетную точку принимается центральная точка на поверхности детали, за расчетную точку 2 принимается точка на периферии поверхности детали (описывающая окружность большего радиуса)

По приведенным алгоритмам построены кривые зависимости толщины покрытия от смещения относительно оси катода, а также зависимости точности от количества деталей, изображенные на рис. 7–8.

Расчет производился для нанесения покрытия из нитрида Ti на установке ННВ-6,6-И1.

Параметры процесса, характеристики оборудования и габариты детали сведены в таблице.

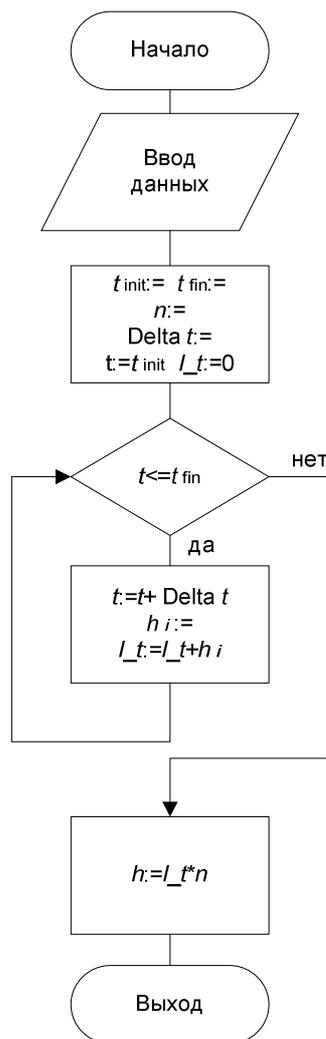


Рис. 4. Алгоритм расчета толщины покрытия без смещения от оси катода

На рис. 7 изображена кривая влияния расстояния от оси катода до обрабатываемой поверхности на толщину конденсированного покрытия, а также указаны соответствующие значения полученные экспериментально. При проведении экспериментов образцы устанавливались в отверстия технологической оснастки установки ННВ-6,6-И1 на расстоянии 30 мм, замер толщины покрытия производился в центральной точке образца.

Таблица

Значения параметров и констант, использованных в расчетах

m_i , кг	\bar{z}	e , Кл	ρ , кг/м ³	α_k	μ_p , кг/Кл	I_d , А	R_k , м
$79,5 \cdot 10^{-27}$	1,79	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$4,54 \cdot 10^3$	1	$53 \cdot 10^{-9}$	100	0,04
$U_{образца}$, М	$z_{образца}$, М	$n_{уст}$	$z_{технол}$, М	t , с	$R_{стола}$, М	$x_{центра}$, М	
0,05	0,03	24	0,005	3600	0,15	0,43	

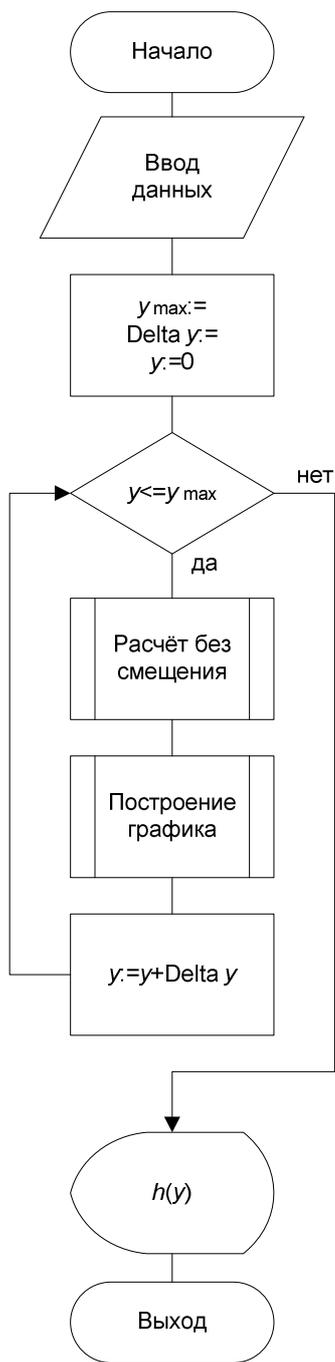


Рис. 5. Алгоритм расчета зависимости толщины конденсированного покрытия от смещения относительно оси катода

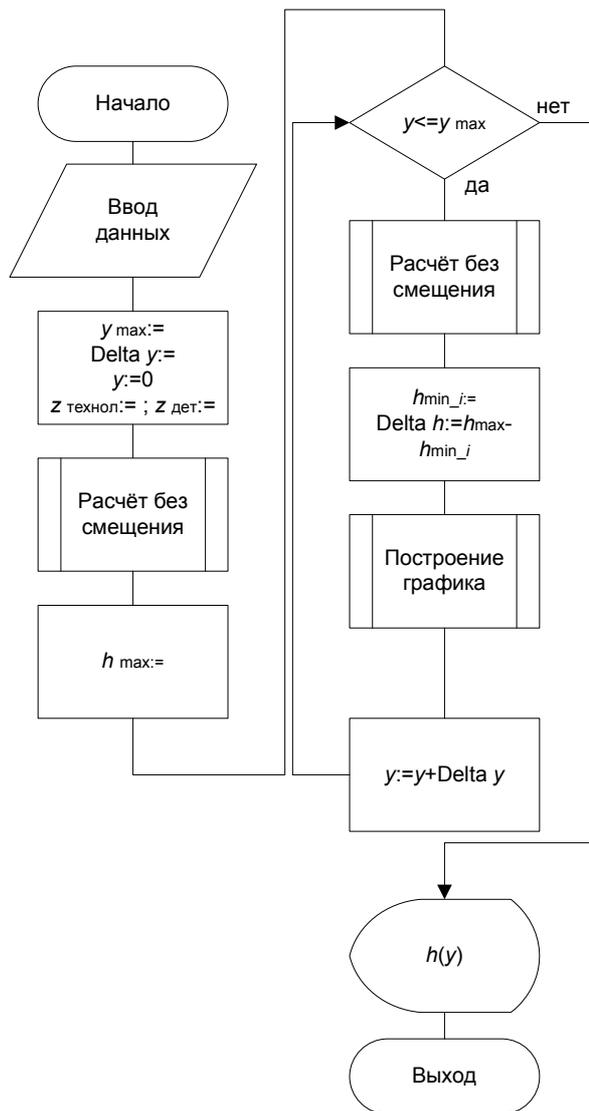


Рис. 6. Алгоритм расчета зависимости толщины покрытия от количества деталей

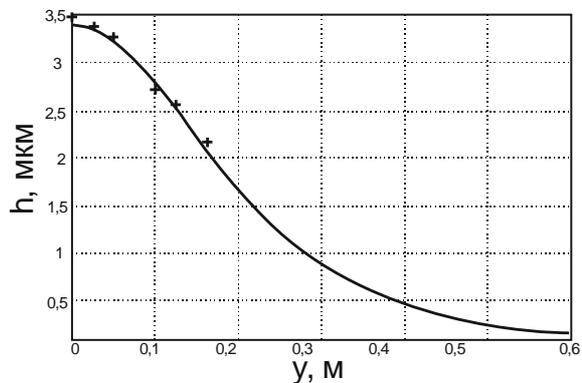


Рис. 7. Зависимость толщины покрытия от расстояния от оси катода с учетом вращения (— – расчетная кривая, + – экспериментальные точки)

Из графика видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

На рис. 8 приведен график зависимости точности покрытия от количества деталей в садке.

По приведенным на рис. 8 данным можно оценить погрешность толщины покрытия при заданных количестве и габаритах деталей.

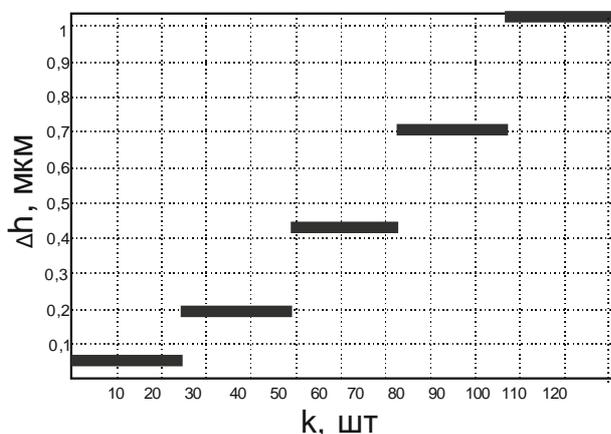


Рис. 8. Зависимость точности покрытия от количества деталей в садке (высота деталей 50 мм, ширина 30 мм, размеры вакуумной камеры соответствуют ННВ-6,6-И1)

ВЫВОДЫ

1. В данной работе предложена методика расчета толщины покрытия, погрешности обработки от смещения относительно оси катода. В отличие от существующих методов расчета в данной методике учитывается влияние движения деталей вокруг оси стола.

2. По предложенной методике разработаны алгоритмы автоматизированного расчета параметров и зависимостей толщины покрытия и погрешности покрытия от смещения относительно оси катода и погрешности обработки

в зависимости от количества обрабатываемых деталей;

3. Сравнение экспериментальных данных с данными графика зависимости толщины покрытия от смещения относительно оси катода доказали адекватность предложенной модели.

4. Получены данные для оценки точности обработки деталей в зависимости от их количества применительно к установкам типа ННВ-6,6-И1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будилов В. В., Мухин В. С., Минаева О. Б. Математическое моделирование процесса осаждения вакуумных ионно-плазменных покрытий // Известия вузов. Авиационная техника. 1995. № 1. С. 92–95.
2. Смоланов Н. А., Панькин Н. А. Определение коэффициента осаждения при модификации поверхности ионами различных энергий // Химия твердого тела и современные микро и нанотехнологии. VI Международная конференция. Ставрополь: Сев-КавГТУ, 2006. 510 с.
3. Будилов В. В., Киреев Р. М., Шехтман С. Р. Технология вакуумной ионно-плазменной обработки: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2007. 155 с.

ОБ АВТОРАХ

Киреев Радик Маратович, доц. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1993). Канд. техн. наук по тепл. двигателя летательн. аппаратов (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных методов модифицирования поверхностей.

Ягафаров Ильгиз Ирекович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.