

УДК 621.793

Оптимизация кинематических режимов магнетронного напыления на основе расчета неравномерности покрытия

Демидов П.С., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

Научный руководитель: Сагателян Г.Р., д.т.н, профессор

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

schashurin@bmstu.ru

Введение

Технология нанесения высококачественных тонких пленок и покрытий на разнообразные изделия важна для различных видов приборо- и машиностроения и других отраслей техники, поскольку показатели надежности и эффективности механизмов и деталей в значительной мере определяются поверхностными свойствами используемых материалов [1].

В получении функциональных покрытий для разных применений одним из распространенных способов является магнетронный способ нанесения. В магнетронном способе ионизированная плазма создается в результате бомбардировки мишени ионами аргона. Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала. Для эффективной ионизации аргона, распыляемый материал (мишень) размещают на магните (рис. 1).

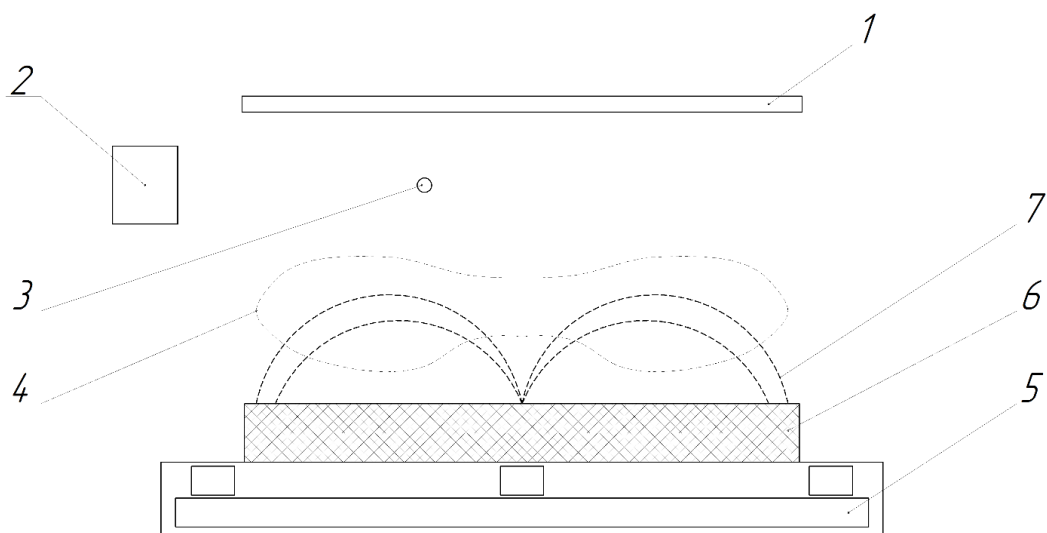


Рис. 1. Схема магнетронного напыления: 1 – подложка; 2 – аргоновая пушка; 3 – атом распыляемого материала; 4 – плазма; 5 – катод; 6 – мишень; 7 – магнитные силовые линии

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 нее частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде плёнки на подложке, а также частично рассеиваются на молекулах остаточных газов или осаждаются на стенках рабочей вакуумной камеры и оснастке.

Осаждаемое на изделие покрытие формируется исключительно на атомарном уровне без каких-либо включений микрокапель. Магнетронный способ нанесения покрытий позволяет распылять практически все виды материалов, включая металлы и сплавы, простые и сложные диэлектрики, полупроводники и керамику. Осаждаемые материалы могут сочетаться в различных комбинациях и в виде многослойных покрытий. Толщина покрытий может составлять от десятков нанометров до десятков микрон.

Целью выполнения операции напыления является не только получение тонкой пленки, но также и обеспечение равномерности её толщины по подвергаемой напылению поверхности подложки. Основные причины возникновения неравномерности толщины покрытия на подложке рассмотрены в работе [2].

Для анализа неравномерности распределения толщины покрытия будет рассмотрена дуальная магнетронная распылительная система, состоящая из двух расположенных рядом под некоторым углом друг к другу магнетронов [2, 3]. Схема вакуумной установки представлена на рис. 2. Магнетроны оснащаются мишенями,

Математическая модель для расчета скорости напыления

Будем предполагать, что в произвольной точке A поверхности детали скорость роста ξ толщины покрытия определяется величиной [4, 5]:

Будем предполагать, что в произвольной точке A поверхности детали скорость роста ξ толщины покрытия определяется величиной [4, 5]:

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

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/791055.html>

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

h_m – максимум диаграммы направленности распыления, $\text{частиц}/\text{с}$,

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

φ – угол направленности, соответствующий рассматриваемой точке A (угол распыления),

ε – угол падения для точки A (угол конденсации).

Схема для расчета геометрических величин ρ , φ , ε представлена на рис. 3. Для определения их значений воспользуемся векторно-координатным методом.

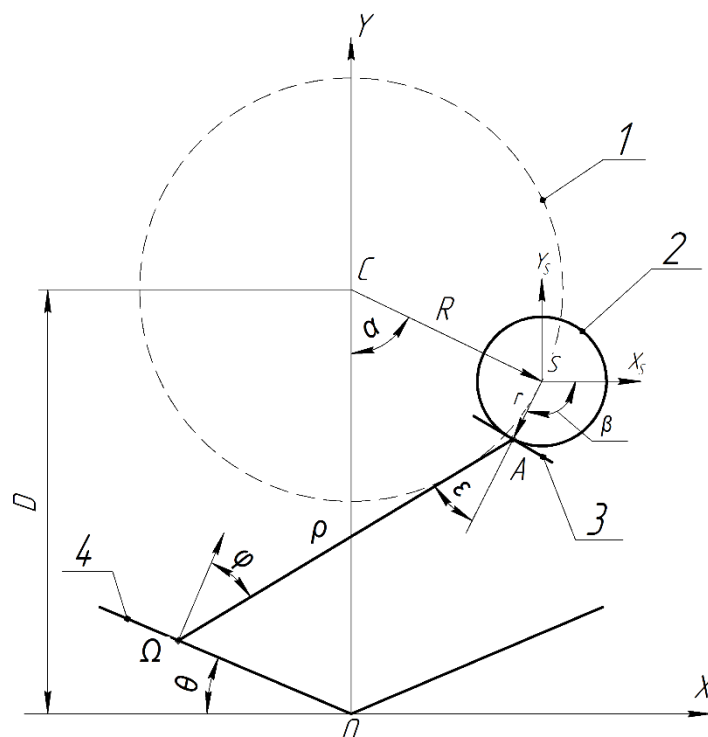


Рис. 3. Схема установки для вычисления геометрических параметров: 1 – карусель; 2 – спутник; 3 – напыляемая деталь; 4 – плоскость поверхности магнетрона

Определим координаты точки на напыляемой детали в зависимости от угла ее поворота. Координаты центра спутника при повороте карусели на угол α в системе координат, где ось Y совпадает с осью симметрии установки, а ось X перпендикулярна ей:

$$x_c = R \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$y_c = R \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + D,$$

где R – радиус расположения сателлитов на карусели.

Угол $-\frac{\pi}{2}$ является начальным углом поворота карусели.

Координаты точки центра напыляемой детали, находящейся на сателлите в системе координат, связанной с точкой вращения сателлита, в зависимости от угла поворота сателлита β :

$$\begin{aligned}x_S &= r \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right), \\y_S &= r \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right),\end{aligned}$$

где r – радиус расположения деталей на сателлите.

Углы α и β связаны соотношением

$$\beta = n \cdot \alpha,$$

где n – отношение частот вращения сателлита и карусели.

Точка центра напыляемой детали в системе координат, связанной с установкой, имеет координаты:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_C + x_S = R \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + r \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right), \\y_0 &= y_C + y_S = R \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + r \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right).\end{aligned}$$

Точка A поверхности детали, отстоящая от ее центра на расстоянии x_A , имеет координаты:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + x_A \cdot \cos(\beta) = R \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + r \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + x_A \cdot \cos(\beta), \\y &= y_0 + x_A \cdot \sin(\beta) = R \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + r \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + x_A \cdot \sin(\beta).\end{aligned}$$

Зная расстояния от оси симметрии установки до источников напыления, можно найти координаты источников:

$$\begin{aligned}x_{\Omega_R} &= \chi_{\Omega_R} \cdot \cos(\theta_R), & y_{\Omega_R} &= \chi_{\Omega_R} \cdot \sin(\theta_R), \\x_{\Omega_L} &= -\chi_{\Omega_L} \cdot \cos(\theta_L), & y_{\Omega_L} &= \chi_{\Omega_L} \cdot \sin(\theta_L),\end{aligned}$$

где χ_{Ω_R} – расстояние от оси симметрии установки до источника напыления справа,

χ_{Ω_L} – расстояние от оси симметрии установки до источника напыления слева,

θ_R – угол наклона правого магнетрона,

θ_L – угол наклона левого магнетрона.

Величины $\chi_{\Omega Ri}$, $\chi_{\Omega Li}$, θ_R , θ_L считаются заданными. Зная координаты рассматриваемой точки напыления при угле поворота сателлита на угол β , можно найти расстояние от источника до точки напыления:

$$\rho = \sqrt{(x - x_{\Omega})^2 + (y - y_{\Omega})^2},$$

где x_{Ω} , y_{Ω} – координаты источника напыления.

Угол направленности φ найдем, вычислив угол между двумя векторами, один из которых перпендикулярен плоскости магнетрона, а второй вектор $\{x - x_{\Omega}, y - y_{\Omega}\}$ направлен от источника Ω к рассматриваемой точке A (рис. 4).

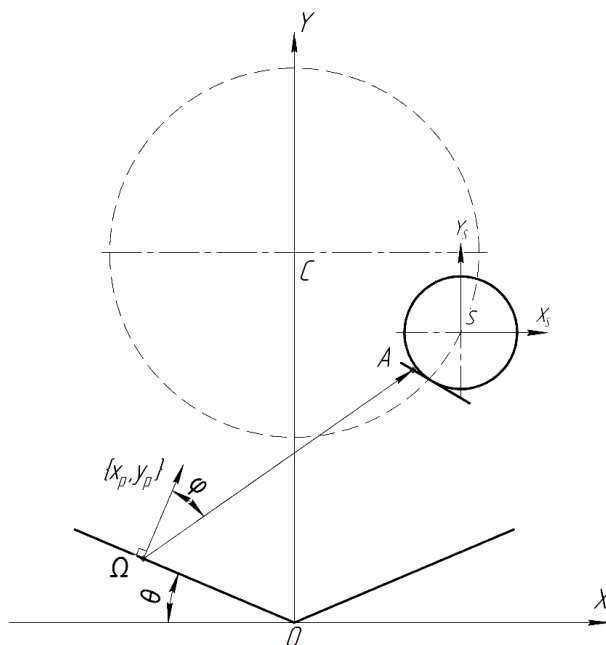


Рис. 4. Схема для расчета угла направленности φ

Вектор $\{x_p, y_p\}$, перпендикулярный плоскости магнетрона, может быть определен как $\{\sin(\theta), \cos(\theta)\}$ для левого магнетрона и $\{-\sin(\theta), \cos(\theta)\}$ для правого магнетрона.

Угол φ найдем из соотношения для скалярного произведения векторов $\{x_p, y_p\}$ и $\{x - x_{\Omega}, y - y_{\Omega}\}$:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\pm \sin(\theta) \cdot (x - x_{\Omega}) + \cos(\theta) \cdot (y - y_{\Omega})}{\sqrt{(\pm \sin(\theta))^2 + (\cos(\theta))^2} \cdot \sqrt{(x - x_{\Omega})^2 + (y - y_{\Omega})^2}} \right),$$

где знак «+» соответствует левому магнетрону, а «-» – правому.

С учетом того, что $(\pm \sin(\theta))^2 + (\cos(\theta))^2 = 1$, получим:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\pm \sin(\theta) \cdot (x - x_{\Omega}) + \cos(\theta) \cdot (y - y_{\Omega})}{\sqrt{(x - x_{\Omega})^2 + (y - y_{\Omega})^2}} \right).$$

Угол падения ε найдем, вычислив угол между двумя векторами, один из которых направлен от центра вращения сателлита S к центру детали P и перпендикулярен плоскости напыляемой поверхности, а второй направлен из рассматриваемой точки A к источнику напыления Ω (рис. 5).

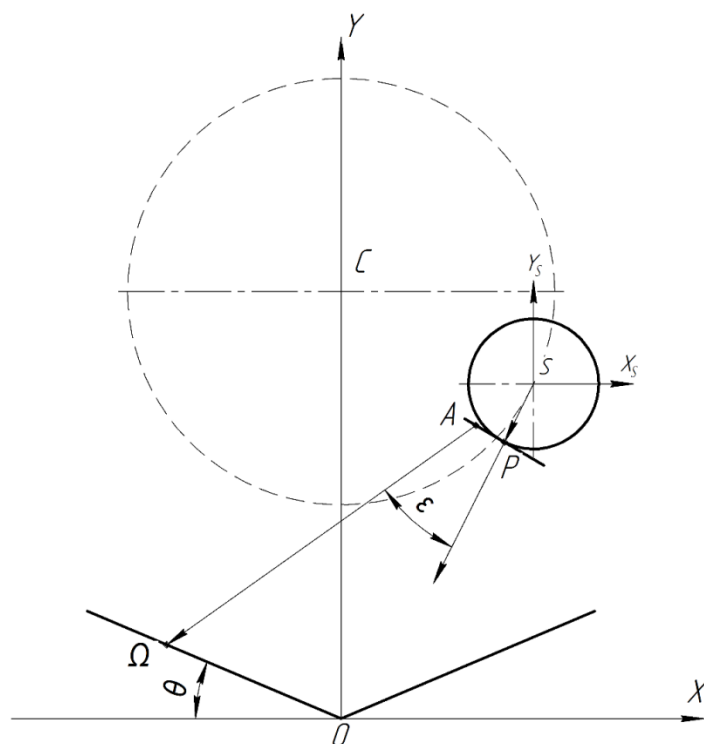


Рис. 5. Схема для расчета угла падения ε

Координаты этих векторов соответственно равны:

$$\overrightarrow{SP} = \{x_0 - x_s, y_0 - y_s\};$$

$$\overrightarrow{A\Omega} = \{x_\Omega - x, y_\Omega - y\}.$$

Угол падения ε между векторами найдем из соотношения для скалярного произведения векторов:

$$\varepsilon = \arccos(\widehat{\overrightarrow{SP}, \overrightarrow{A\Omega}}),$$

откуда

$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{(x_0 - x_s) \cdot (x_\Omega - x) + (y_0 - y_s) \cdot (y_\Omega - y)}{\sqrt{(x_0 - x_s)^2 + (y_0 - y_s)^2} \cdot \sqrt{(x_\Omega - x)^2 + (y_\Omega - y)^2}}\right).$$

Таким образом, зная величины ρ , φ , ε и характеристики материала k и режима распыления h_m , можно найти скорость нанесения покрытия ξ по формуле (1). Выполняя расчет для различных точек x_A напыляемой поверхности, можно получить эпюру распределения напыляемого материала на поверхности детали.

В качестве характеристики неравномерности нанесения покрытия примем величину σ , равную отношению разности между максимальной и минимальной толщиной покрытия к средней толщине покрытия (рис. 6):

$$\sigma = \frac{\Delta H}{H_{\text{сред}}},$$

где $\Delta H = H_{\text{макс}} - H_{\text{мин}}$ – разница между наибольшим и наименьшим значениями толщины нанесенного покрытия,

$H_{\text{сред}} = \frac{\sum H_i}{N}$ – среднее значение толщины покрытия по всем N координатам подложки.

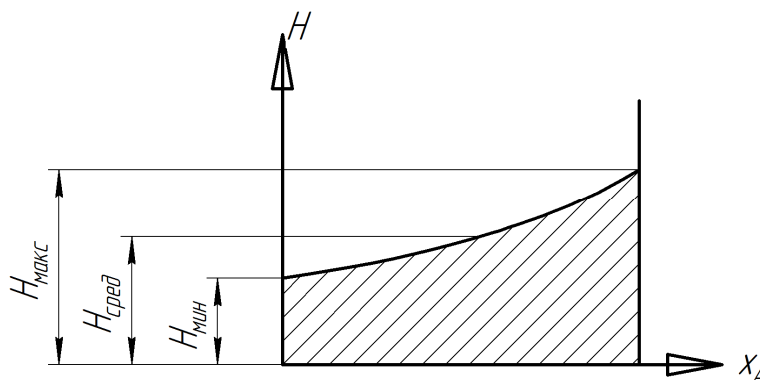


Рис. 6. Эпюра распределения напыленного на поверхности детали материала

Разработка программы для расчета характеристик тонкопленочного покрытия

На основе приведенной математической модели была разработана компьютерная программа. Программа снабжена интерфейсом, представленном на рис. 7.

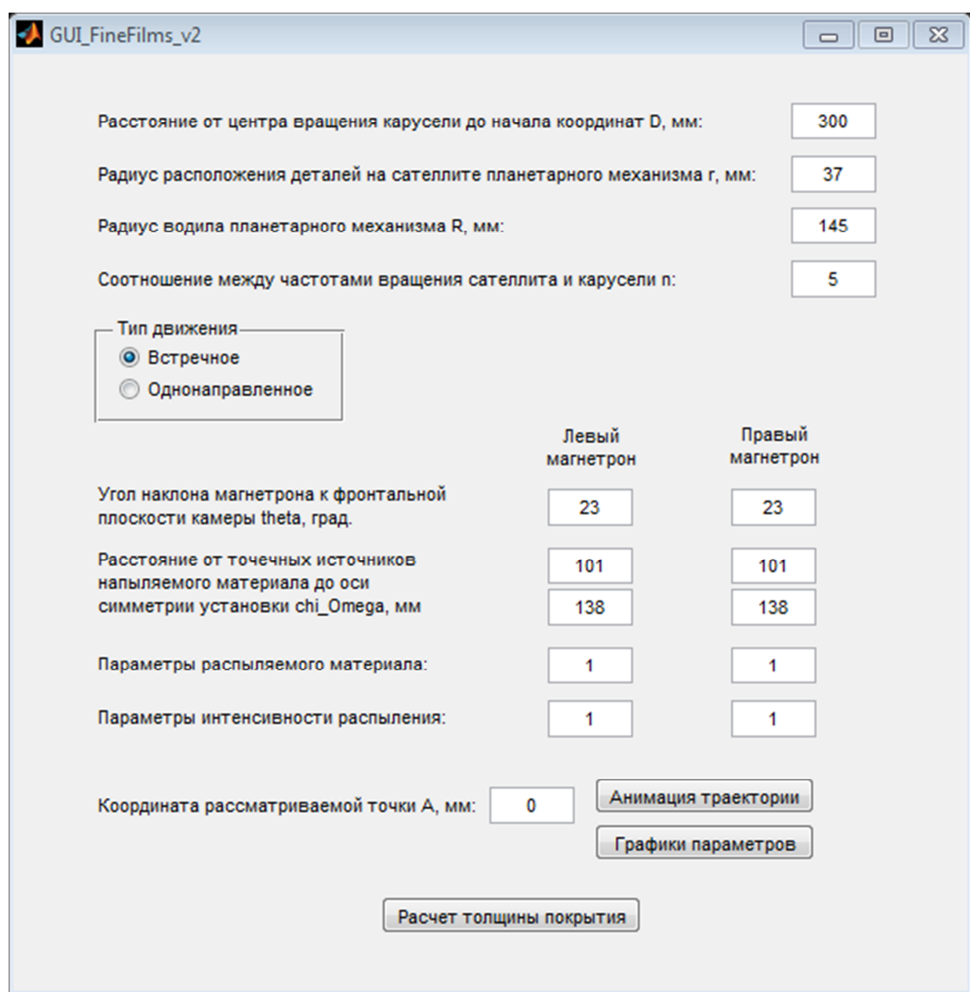


Рис. 7. Интерфейс программы анализа неравномерности толщины слоя при напылении тонкопленочного покрытия

Основными элементами интерфейса программы являются поля ввода данных с их текстовым описанием. В полях ввода на рис. 5 представлены значения, установленные по умолчанию.

При нажатии на кнопку «Анимация траектории» строится траектория движения центра спутника, центра детали и рассматриваемой точки и покадрово показывается положение спутника и детали в зависимости от угла β (рис. 8).

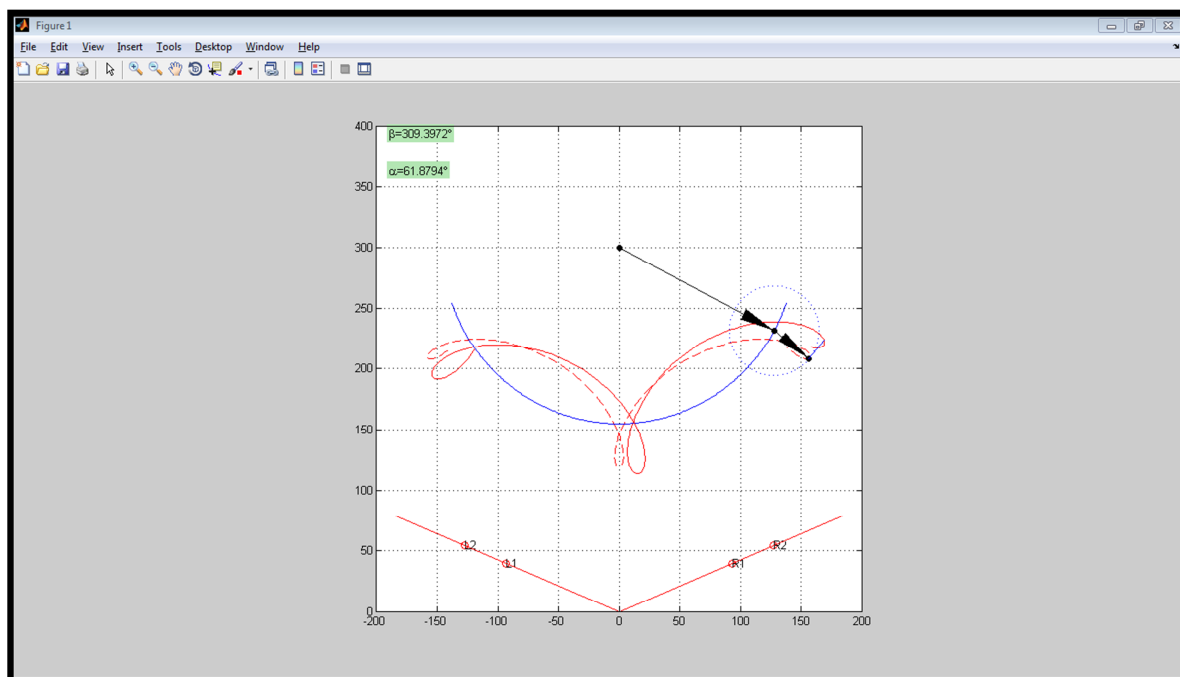


Рис. 8. Кадр анимации движения спутника на карусели и детали

При нажатии на кнопку «Графики параметров» появляются четыре окна с графиками зависимостей параметров ρ , φ , ε , $\Delta\xi$ от угла поворота детали β (рис. 9-12).

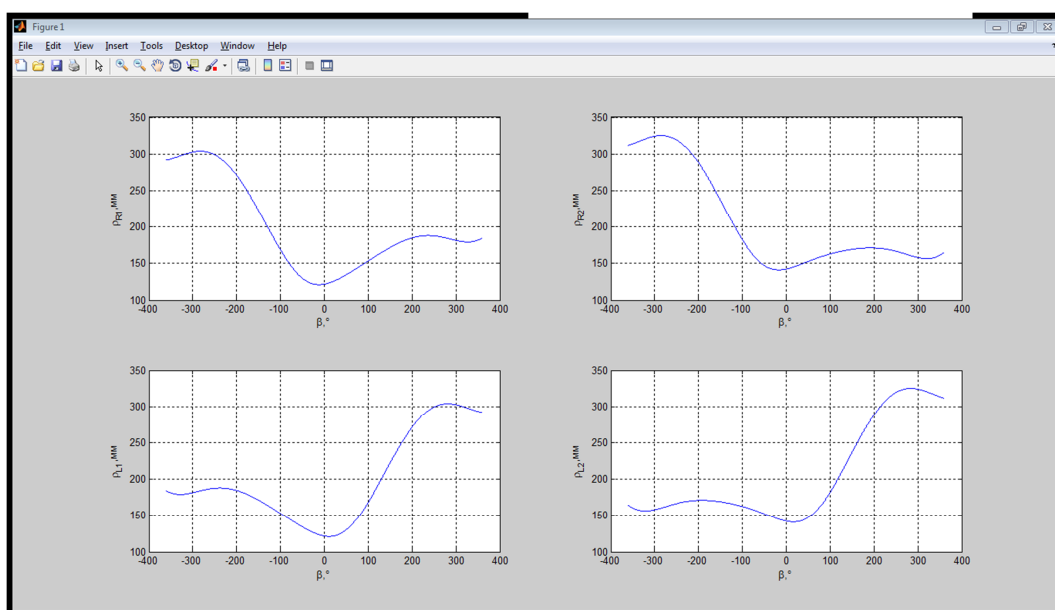


Рис. 9. Графики зависимости расстояния ρ от соответствующих точечных источников

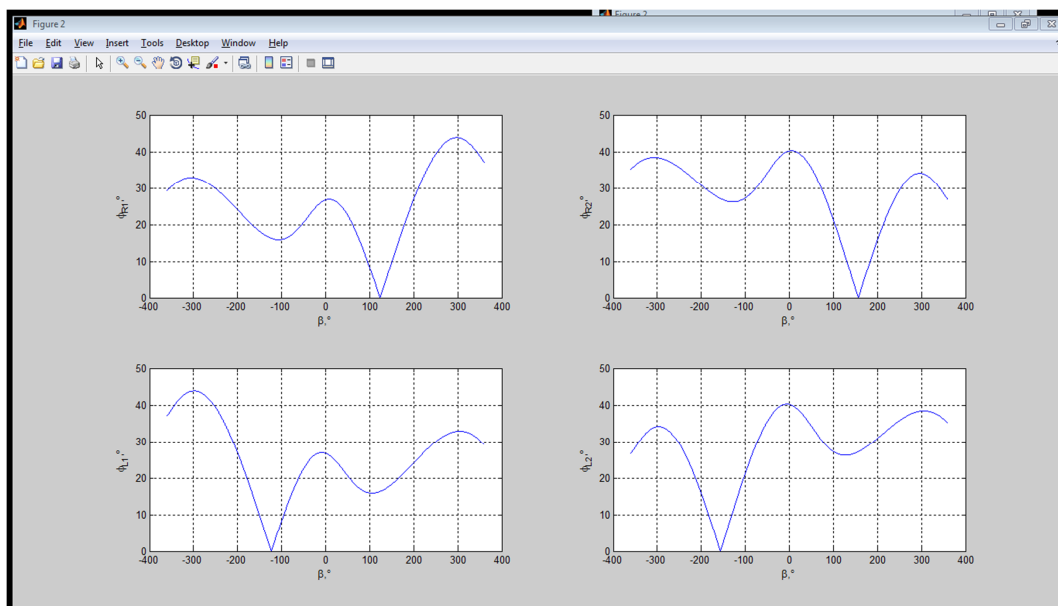


Рис. 10. Графики зависимости угла направленности φ от соответствующих точечных ИСТОЧНИКОВ

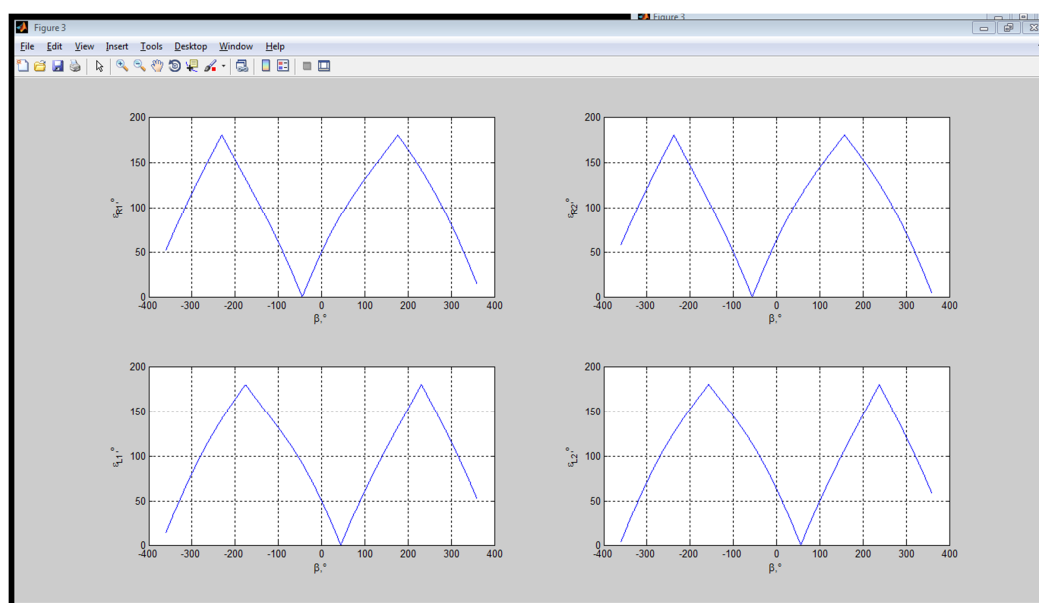


Рис. 11. Графики зависимости угла падения ε от соответствующих точечных источников

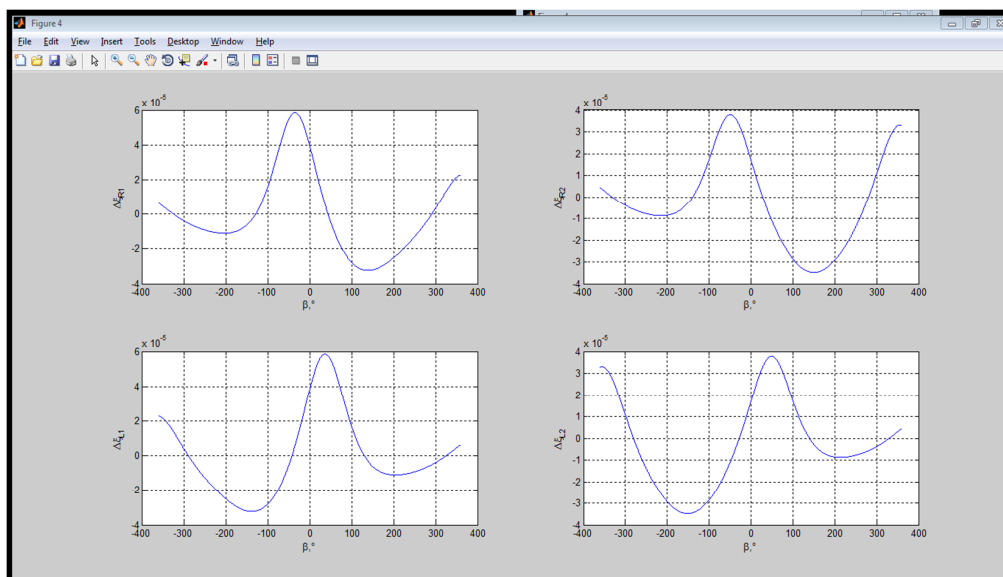


Рис. 12. Графики зависимости скорости напыления $\Delta\xi$ от соответствующих точечных источников

При нажатии на кнопку «Расчет толщины покрытия» строится эпюра распределения толщины тонкопленочного покрытия от левого и правого магнетронов и суммарного слоя (рис. 13). В верхней части окна отображаются численные значения соответствующих слоев: минимальная, максимальная и средняя толщина, характеристика неравномерности σ .

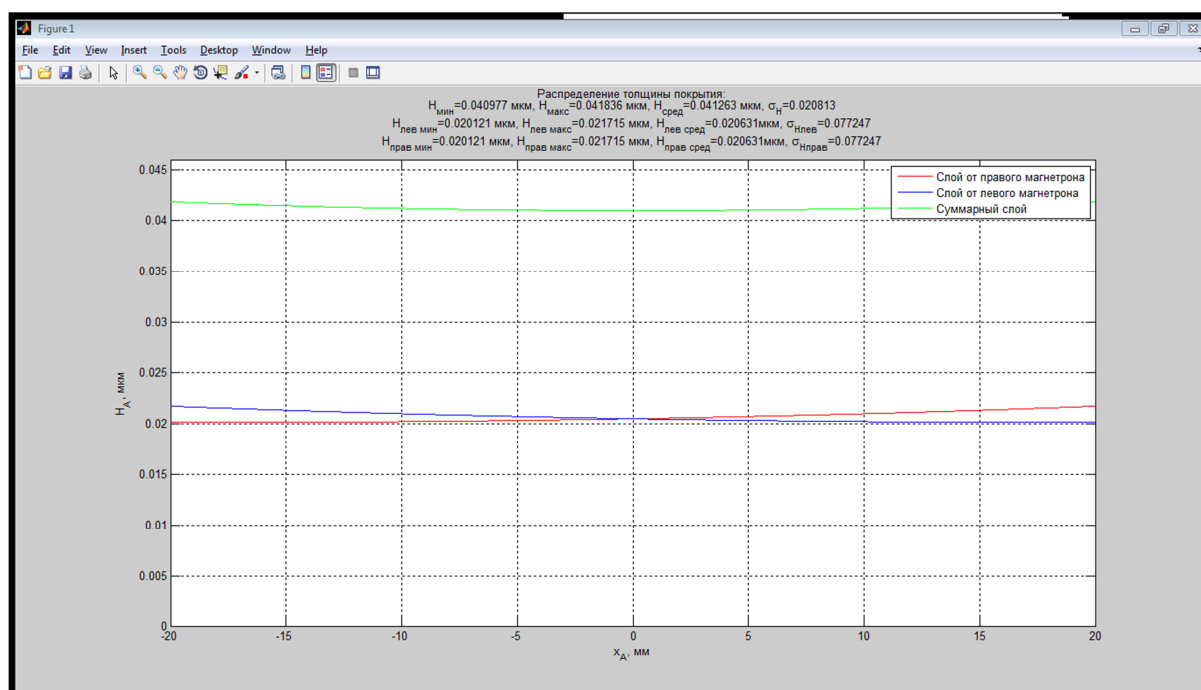


Рис. 13. Эпюра распределения толщины тонкопленочного покрытия

Оценка коэффициентов пропорциональности

В качестве оценки коэффициента k , зависящего от размеров частиц напыляемого материала, примем объемы атомов соответствующих материалов. В таблице 1 приведены результаты расчета коэффициента k для титана, алюминия и хрома.

Таблица 1

Коэффициенты k для различных материалов

Материал	Радиус атома, пм	Коэффициент k , $\frac{\text{мкм} \cdot \text{мм}^2}{\text{частицу}}$
Титан Ti	149	$1,4 \cdot 10^{-17}$
Алюминий Al	143	$1,2 \cdot 10^{-17}$
Хром Cr	127	$8,6 \cdot 10^{-18}$

Чтобы найти коэффициенты h_m при различных режимах работы установки, был проведен ряд экспериментов, числовые результаты которых сведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов

Номер эксперимента	Покрывание	Схема напыления	Время нанесения основного слоя, мин	Ток на мишени (мишенях), А	Толщина, мкм
1	Al	Дуальная	240	5,4/5,1	16
2	Ti	Дуальная	120	8,3/8,0	4
3	TiAl	Дуальная	120	12/6,0	8

Для оценки максимума диаграммы направленности распыления h_m заменим в формуле (1) множитель $\frac{1}{\rho^2} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon$ на коэффициент l , который характеризует кинематический режим работы системы. Тогда формула для расчета толщины покрытия от одного магнетрона за один цикл длительностью t примет вид:

$$H = k \cdot h_m \cdot l \cdot t.$$

При четырех оборотах детали за один цикл и скорости вращения сателлита 7,8 об/мин время одного цикла составляет

$$t = \frac{4}{n} = \frac{4 \text{ об}}{7,8 \frac{\text{об}}{\text{мин}}} = 0,51 \text{ мин} = 30,77 \text{ с.}$$

При моделировании при $k = 1 \frac{\text{мкм} \cdot \text{мм}^2}{\text{частицу}}$ и $h_m = 1 \frac{\text{частиц}}{\text{с}}$ средняя расчетная толщина покрытия за один цикл напыления составила 0,04 мкм. Следовательно, коэффициент l при режиме работы двух одинаковых магнетронов равен:

$$l = \frac{H}{2 \cdot k \cdot h_m \cdot t} = \frac{0,04 \text{ мкм}}{2 \cdot 1 \frac{\text{мкм} \cdot \text{мм}^2}{\text{частицу}} \cdot 1 \frac{\text{частиц}}{\text{с}} \cdot 30,77 \text{ с}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-2}.$$

Составив уравнение по формуле (2) для эксперимента 1 по таблице 2, получим:

$$16 \text{ мкм} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-17} \frac{\text{мкм} \cdot \text{мм}^2}{\text{частицу}} \cdot h_m \cdot 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-2} \cdot 240 \text{ мин},$$

откуда:

$$h_m = \frac{16 \text{ мкм}}{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-17} \frac{\text{мкм} \cdot \text{мм}^2}{\text{частицу}} \cdot 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-2} \cdot 240 \text{ мин}} = 7,0 \cdot 10^{16} \frac{\text{частиц}}{\text{с}}.$$

Аналогично были найдены значения h_m для экспериментов 2 и 3 по таблице 2. Таким образом, были получены оценки значений h_m для различных экспериментов (таблица 3).

Таблица 3

Коэффициенты h_m для различных режимов

Номер эксперимента	Покрытие	Ток на мишени (мишенях), А	Коэффициент h_m , частиц/с.
1	Al	5,4/5,1	$7,0 \cdot 10^{16}$
2	Ti	8,3/8,0	$3,1 \cdot 10^{16}$
3	TiAl	12/6,0	$6,5 \cdot 10^{16}$

Исследование равномерности нанесения покрытия в зависимости от значения отношения частот вращения сателлита и карусели

Для поиска оптимальных кинематических параметров и параметров конструкции магнетронной напылительной системы с помощью математической модели были проведены исследования зависимости равномерности нанесения покрытия от значения отношения частот вращения сателлита и карусели n .

На рис. 14 и 15 приведены распределения толщины покрытия при различных значениях n . Значения параметров k и h_m соответствуют условиям напыления алюминия с обоих магнетронов при токах на них 5,4 А и 5,1 А в течение 60 мин. Знак «-» перед n означает, что движение спутника и карусели однонаправленное.

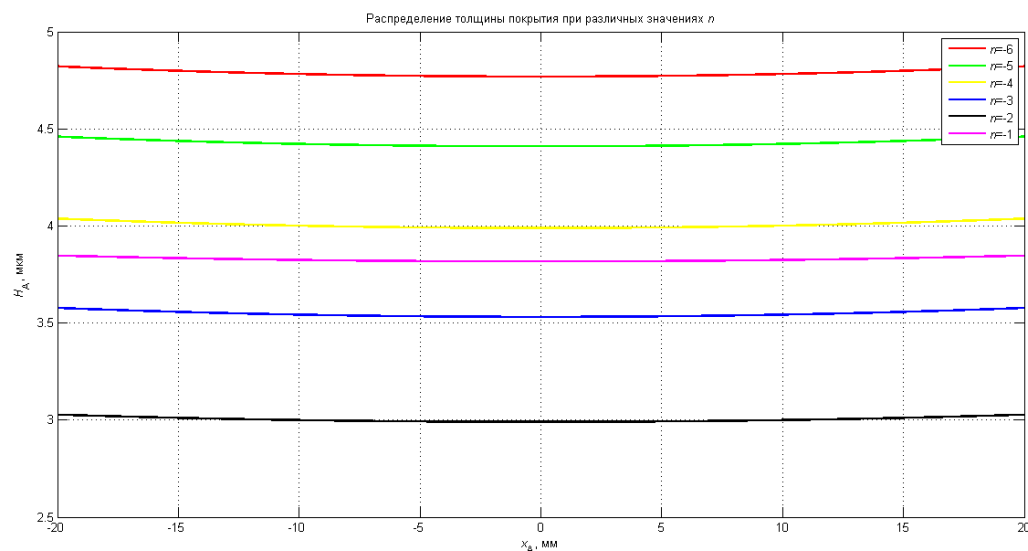


Рис. 14. Распределения толщины покрытия при n от -6 до -1

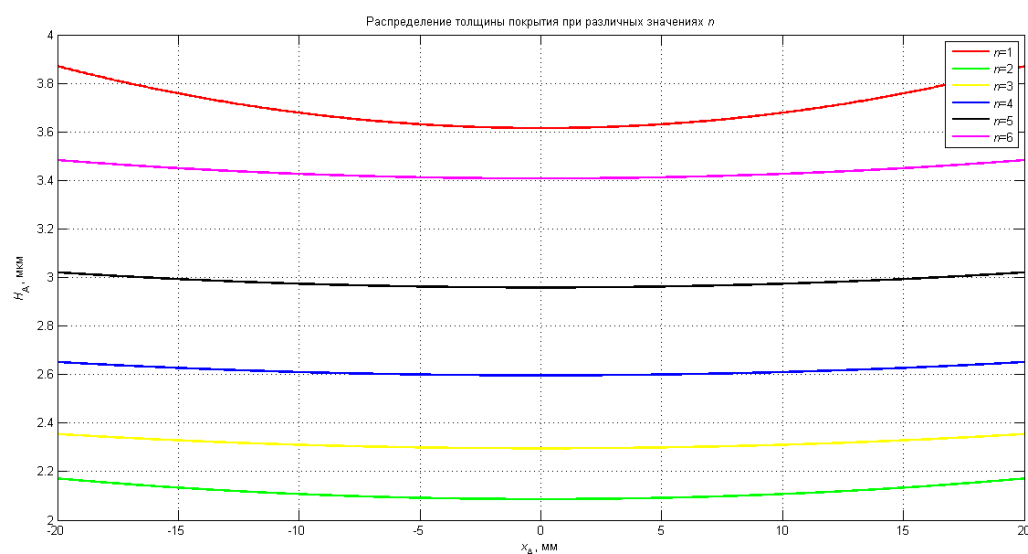


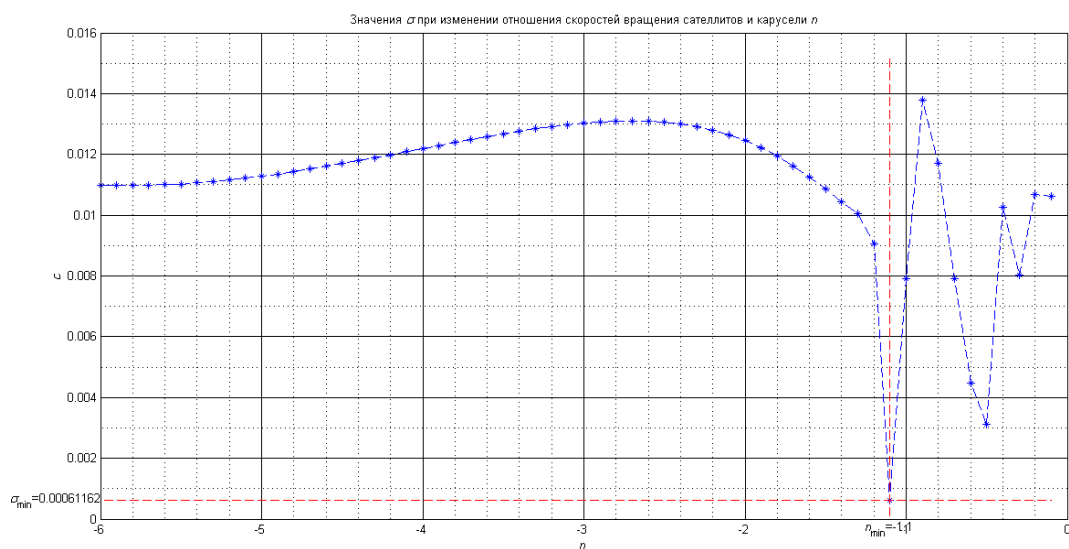
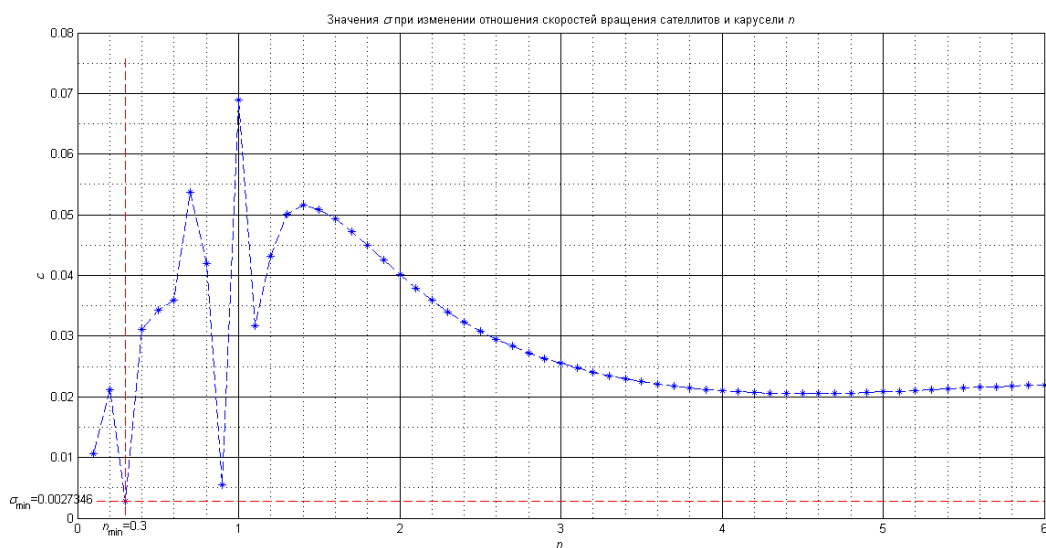
Рис. 15. Распределения толщины покрытия при n от 1 до 6

В таблице 4 представлены значения σ для слоев, представленных на рис. 14 и 15.

Значения σ при различных значениях n .

n	-6	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5	6
σ	0,011	0,011	0,012	0,013	0,012	0,008	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02

На рис. 16 и 17 представлены графики изменения значения σ при различных значениях n .

Рис. 16. Значения σ при n от -6 до -0,1Рис. 17. Значения σ при n от 0,1 до 6

Из графиков видно, что наибольшая равномерность слоя достигается при $n = -1,1$. Значение σ при этом достигает 0,0006.

Исследование равномерности нанесения покрытия в зависимости от углов наклона магнетронов

Были проведены исследования равномерности нанесенного покрытия в зависимости от углов наклона магнетронов.

Были смоделированы условия напыления алюминия с обоих магнетронов при соотношении частот вращения сателлита и карусели $n = -1,1$, соответствующем минимальному значению неравномерности толщины покрытия, при одинаковых углах наклона θ левого и правого магнетронов. На рис. 18 приведены эпюры распределения материала для различных углов наклона магнетронов.

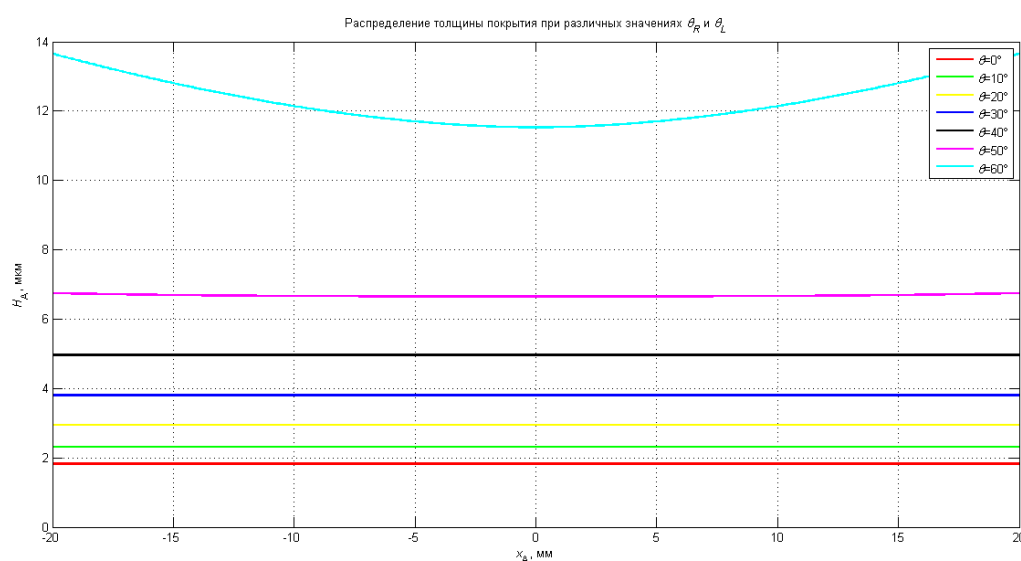


Рис. 18. Распределения толщины покрытия при θ от 0 до 60°.

Из рис. 18 видно, что при дуальном напылении форма напыленного слоя является вогнутой. В таблице 5 приведены значения σ , соответствующие слоям, эпюры которых показаны на рис. 18.

Таблица 5

Значения σ при различных значениях θ

$\theta, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60
σ	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$

На рис. 19 представлен график изменения значения σ при различных значениях θ .

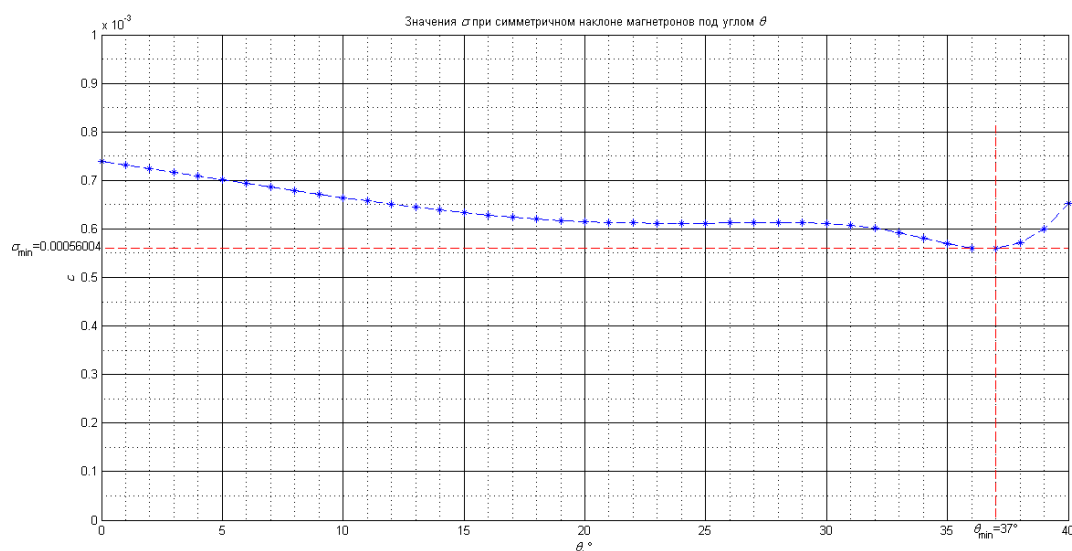


Рис. 19. Значения σ при θ от 0 до 40°

Из него видно, что наибольшая равномерность слоя достигается при $\theta = 37^\circ$. Значение σ при этом достигает $5,6 \cdot 10^{-4}$.

Были смоделированы условия напыления алюминия и титана при токах на магнетронах 12 и 6 А соответственно. На рис. 20 представлено семейство графиков значений σ , соответствующих различным углам наклона магнетронов.

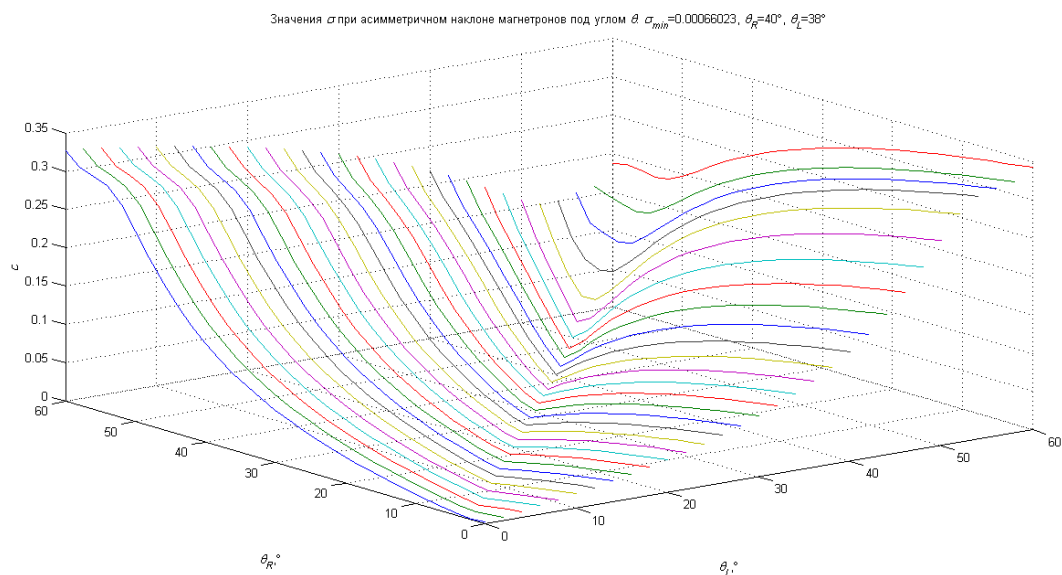


Рис. 20. Значения σ при различных углах наклона левого и правого магнетронов

Минимальное значение σ соответствует наклону левого магнетрона (алюминий) $\theta_L = 38^\circ$, правого (титан) $\theta_R = 40^\circ$ и составляет $6,6 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

Таким образом, на основе разработанной математической модели и экспериментальных данных были получены численные значения коэффициентов пропорциональности, зависящих от материала и режима напыления, благодаря которым возможно вычислить толщину покрытия. Для различных материалов и режимов были проведены исследования по поиску оптимальных кинематических параметров напыления, при которых неравномерность толщины нанесенного покрытия достигает минимального значения.

Список литературы

1. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киров: Аверс, 2008. 244 с.
2. Сагателян Г.Р., Шишлов А.В. Анализ распределения толщины тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении на установках с планетарным перемещением подложки // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. DOI: 10.7463/1114.0733662.
3. Федотов А.В., Агабеков Ю.А., Мачкин В.П. Многофункциональные нанокompозитные покрытия. // Наноиндустрия. 2008. № 1. С. 24–26.
4. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: Моделирование в среде MathCAD. Практикум / под ред. Г.Д. Кузнецова. М.: МИСИС, 2001. 48 с.
5. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.