

где r_u и r_k – соответственно сопротивление частицы ферро-порошка и в контакте между ними.

Тогда сопротивление одной цепочки будет равно

$$R_j = \frac{\Delta U_j}{i_j} = \frac{i_j \cdot r_u \cdot k}{i_j} + \frac{i_j \cdot r_k \cdot (k+1)}{i_j} = r_u \cdot k + r_k \cdot (k+1).$$

Электрическую проводимость порошка в рабочей зоне определим из соотношения

$$\frac{1}{R} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j} = \frac{N}{r_u \cdot k + r_k \cdot (k+1)}.$$

В случае расчета сопротивления частицы ферропорошка шаровидной формы выделим в ней слой, перпендикулярный оси y толщиной dy (рис. 2).

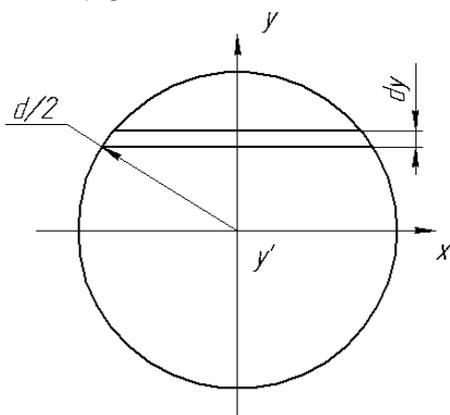


Рис. 2. Схема для определения электрического сопротивления частицы ферропорошка в межэлектродном зазоре при электромагнитной наплавке.

Площадь сечения слоя, расположенного на расстоянии y' от центра частицы будет равна

$$S(y') = \alpha_v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - 4y'^2),$$

а электрическое сопротивление слоя порошка тогда определится из зависимости

УДК 621.793.18

Мрочек Ж.А., Иванов И.А., Султан С.А.И.

РАСЧЁТ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ МАТЛАВ

Для ионно-плазменных способов осаждения покрытий одним из важных факторов, влияющих на функциональные свойства поверхности, является толщина осажденного слоя [1], поэтому разработка методов расчета и контроля толщины формируемых покрытий является актуальной [2].

Основная цель работы – это разработка на базе пакета прикладных программ MATLAB опытно-статистических моделей для расчета скорости осаждения покрытий в зависимости от технологических параметров процесса с визуализацией результатов.

Для аналитического описания известных экспериментальных зависимостей выбирались эмпирические формулы в виде многочленов, степень которых заранее была не известна [3].

Иванов Игорь Аркадьевич, д.т.н., доцент, зав. каф. «Основы машиностроительного производства и профессиональное обучение» Белорусского национального технического университета.

Салем Абубакер Султан Имхимад, аспирант Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220107, г. Минск, пр. Партизанский, 77.

Машиностроение

$$dr = \rho \cdot \frac{4 \cdot dy'}{\alpha_v \cdot \pi \cdot (d^2 - 4y'^2)}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление частицы порошка.

Интегрируя (2), получаем уравнение для определения электрического сопротивления частицы ферропорошка

$$r = \frac{8\rho}{\pi} \cdot \int_0^{\tilde{y}} \frac{dy'}{d^2 - 4y'^2},$$

где \tilde{y} – координата, при которой площадь сечения шаровидной порошинки будет равна $\pi x^2(y)$.

Для определения контактных сопротивлений между частицами порошка используем зависимость [2]

$$r_k \approx \frac{1}{\sqrt[3]{p}},$$

где p – давление в контакте.

Давление в контакте p определяется как отношение силы F , действующей в контакте, к площади контакта ΔS .

Площадь контакта ΔS определяется зависимостью [3]

$$\Delta S = \pi \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{3dF \cdot (1 - \mu^2)}{8E} \right]^2},$$

где μ и E – соответственно коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала ферропорошка.

Таким образом, получены математические зависимости, определяющие величину электрического сопротивления и давления в рабочей зоне между частицами ферропорошка при электромагнитной наплавке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кожуро Л. М., Чемисов Б. П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
2. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
3. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.

Для построения интерполяционных полиномов использовался метод неопределенных коэффициентов, реализуемый на базе пакета прикладных программ [4].

В качестве примера рассматривался однокомпонентный плазменный поток, формируемый при испарении вакуумной дугой титана марки ВТ1-0. При моделировании за источник плазмы (центр испарения) принималась точка пересечения оси испарителя с поверхностью катода.

Исходные экспериментальные данные для интерполяции [5] – вертикальный срез осесимметричного плазменного потока с изолиниями скоростей осаждения покрытий (рис. 1) – использованы для написания функции MATLAB со следующим прототипом:

function speed = speed_interpolate(x1, y1, z1),
 где x1, y1, z1 – координаты в декартовой трехмерной системе координат

```
x(1:length(line1)) = line1(1:end,1);
x(length(line1)+1:length(line1)+length(line2)) = line2(1:end,1);
x(length(line1)+length(line2) +
1:length(line1)+length(line2)+length(line3)) = line3(1:end,1);
y(1:length(line1)) = line1(1:end,2);
y(length(line1)+1:length(line1)+length(line2)) = line2(1:end,2);
y(length(line1)+length(line2) +
1:length(line1)+length(line2)+length(line3)) = line3(1:end,2);
z(1:length(line1)) = line1(1:end,3);
z(length(line1)+1:length(line1)+length(line2)) = line2(1:end,3);
z(length(line1)+length(line2) +
1:length(line1)+length(line2)+length(line3)) = line3(1:end,3);
```

Координата x (-80...80) соответствует горизонтальной оси, y (-35...-250) – вертикальной, z (-80...80) – оси направленной перпендикулярно поверхности рисунка (рис. 1). Например, для координат x = 40, y = -100, z = 40: скорость осаждения покрытия определялась как:

```
speed = speed_interpolate(40,-100,40)
```

Результат выполнения функции speed_interpolate (скорость конденсации потока для данной точки поверхности) будет преобразован в переменную speed.

В данной части программного кода для построения трехмерного графика формируются массивы данных по каждой из трех осей- X, Y и Z. Для заполнения указанных массивов использованы числовые значения, полученные при оцифровке экспериментальных зависимостей.

Результат интерполяции функции function speed (рис. 2) может быть представлен в виде функции от двух координат speed = f(x,y) с помощью следующей функции:

```
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI,'v4');
mesh(XI,YI,ZI), hold
plot3(x,y,z,'o'), hold off
```

«Кружками» показаны оцифрованные с исходной модели (рис. 2) линии. Переход от трех координат к двум осуществляется исходя из того, что поток осесимметричный. Ось симметрии – ось y.

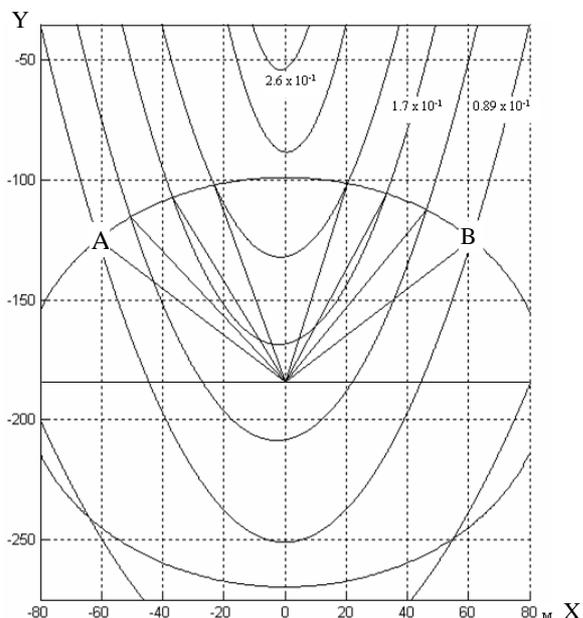


Рис. 1. Горизонтальные сечения плазменного потока, представленные линиями одинаковой скорости осаждения покрытия при токе дугового разряда 70 А.

Результаты экспериментальных исследований, описывающие уменьшение скорости роста покрытия с удалением от поверхности катода вдоль оси испарителя могут быть описа-

ны интерполяционными полиномами (рис. 3) и математическими зависимостями.

Для тока дугового разряда 115 А скорость роста покрытия у зависит от расстояния основы до испаряемой поверхности катода h_1 :

$$h_1 = 2.09 \cdot 10^{-7} \cdot y^3 - 6.95 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 - 8.25 \cdot 10^{-3} \cdot y + 4.005, \text{ мкм/мин.}$$

Для тока дугового разряда 70 А зависимость h_2 можно описать следующим уравнением:

$$h_2 = 2.88 \cdot 10^{-7} \cdot y^3 - 1.12 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 - 1.28 \cdot 10^{-3} \cdot y + 4.147, \text{ мкм/мин.}$$

Используя полученные уравнения и интерполяционную модель, рассчитаем толщину осажденного покрытия с учетом положения основы в вакуумной камере.

Для случая осаждения покрытий на заготовке простой геометрической формы, принципиальное значение для получения покрытий требуемой толщины будет играть только ее положение в вакуумной камере, что связано с наличием пространственного распределения плотности ионного потока плазмы. Действительно, для условий постоянства плотности плазменного потока, траектория движения заготовки детали из точки А в точку В (рис. 1) не влияет на скорость роста и конечную толщину покрытия.

При постоянной скорости осаждения и равномерном движении заготовки из точки А в точку В суммарная масса (толщина) осажденного покрытия на участке площадью S (м²), перпендикулярной потоку плазмы, равно $M = m \times S \times t$, где m – постоянная массовая скорость потока мкг/мин; t – время осаждения (движения участка площадью S из точки А в точку В) покрытия, мин.

Для основы, которая движется относительно оси камеры по окружности с радиусом R (мм), уравнение для определения массы покрытия имеет следующий вид:

$$M = S \times \frac{\pi R}{\omega_0} \times m,$$

где ω_0 – скорость углового вращения, мин⁻¹. Так как, $\frac{\pi R}{\omega_0} = t$, то и в данном случае скорость осаждения покрытия

на неподвижной основе будет определяться также как и для вращающейся.

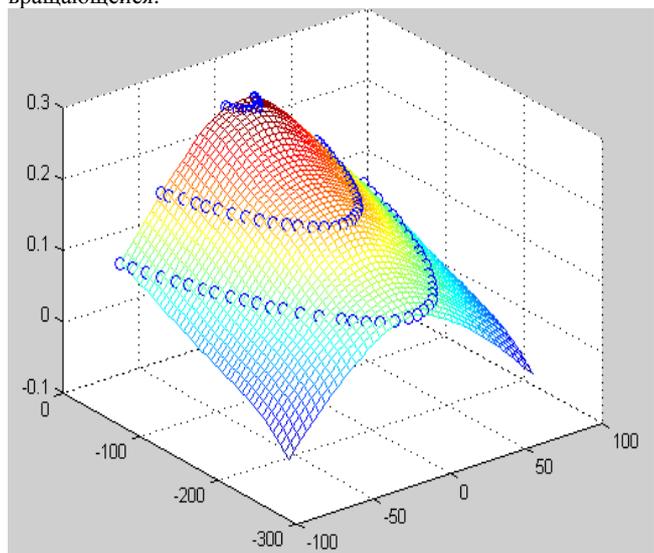
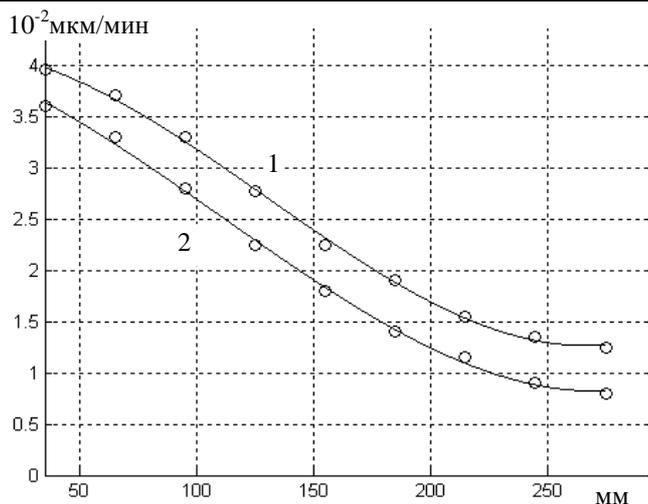


Рис. 2. Графическая 3-D модель скорости осаждения покрытий в различных точках рабочего пространства вакуумной камеры при токе дугового разряда 70 А.



1- $j = 115A$; 2- $j = 70A$

Рис. 3. Изменение скорости осаждения титанового покрытия в зависимости от расстояния между катодом и основой.

Таким образом, масса, а, следовательно, и толщина покрытия на площади S будет определяться в первую очередь величиной постоянной скорости потока и временем перемещения заготовки детали из точки А в точку В (рис. 4).

При наличии пространственного распределения плотности ионного потока (рис.1) скорость осаждения покрытия на поверхность основы площадью S определяется уравнением:

$$M = \int_B^A m \times \Delta s \times dx, \quad dt = f(dx),$$

где m – переменная скорость потока мкг/мин; Δs – площадь поверхности образца перпендикулярная потоку плазмы, m^2 ; dx – отрезок пути, проходимый участком Δs за время dt .

Движение заготовки из точки А в точку В, в начальный момент, сопровождается ростом скорости осаждения покрытия. Максимальная скорость роста соответствует положению заготовки на оси испарителя. Затем заготовки, продолжая двигаться к точке В, удаляется от оси испарителя и скорость осаждения потока падает (рис. 4).

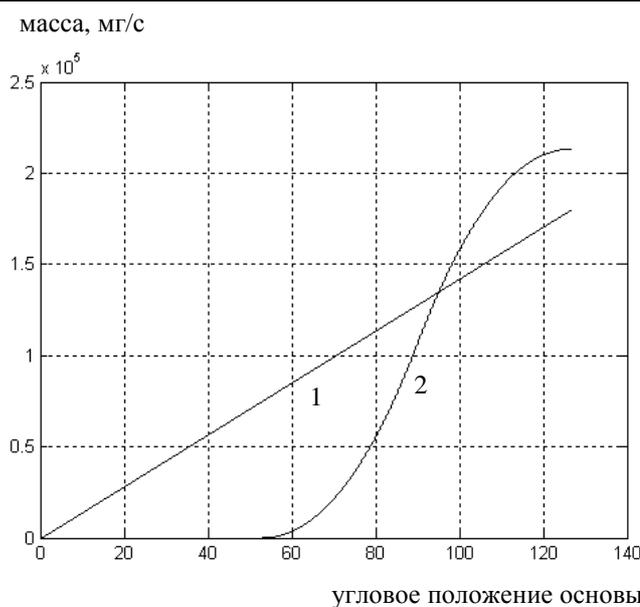
В результате проведенных исследований получены математические модели для расчета скорости осаждения однокомпонентной плазмы, которая допускает визуализацию результатов расчетов и позволяет определить скорость осаждения покрытий на поверхность движущейся заготовки с учетом пространственного распределения плотности ионно-плазменного потока.

УДК 621.793

Петришин Г.В., Пантелеенко Ф.И., Пантелеенко Е.Ф., Пантелеенко А.Ф.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ

Введение. В ряде работ, посвященных исследованием технологии электроискрового легирования (ЭИЛ) и магнитно-



1- $m = const.$; 2- $m \neq const.$

Рис. 4. Графическое представление зависимости толщины осажденного слоя от положения основы в вакуумной камере.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. J.M.Pointevin, G.Lemeriére, J.Tardy Influence of substrate bias on the composition, structure and electrical properties of reactively D.C.-sputtered TiN films// Thin Solid Films.-1982.- vol.97.- P.61-77.
2. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий/ Кундас С., Достанко А.П., Ильющенко А.Ф и др. – Мн: Бестпринт, 1998.-212 с.
3. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента.-М.: Наука, 1971. – 192 с.
4. Кетков Ю.Л., Кетков А. Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x: Программирование численных методов. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 672 с.
5. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн: Бестпринт, 1998.-284 с.

Петришин Григорий Валентинович, ассистент каф. технологии машиностроения Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ им. П.О. Сухого, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Пантелеенко Федор Иванович, зав. каф. порошковой металлургии, сварки, технологии материалов Белорусского национального технического университета.

Пантелеенко Екатерина Федоровна, аспирант Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220107, г. Минск, пр. Партизанский, 77.

Пантелеенко Алексей Федорович, студент Полоцкого государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл.-ть, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.