

## **Применение стохастических подходов к моделированию работы вакуумных электродуговых испарительных устройств**

*Иванов И.А.*

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика*

*Беларусь [ihar-ivanou@yandex.ru](mailto:ihar-ivanou@yandex.ru)*

Плазменные электродуговые испарительные устройства широко используются для получения высокоионизованных направленных потоков частиц [1]. Изначально для моделирования движения плазменных потоков в пределах технологического объёма вакуумных камер использовали методы газовой динамики. Несмотря на удовлетворительное качественное описание процесса переноса плазмы от источника до поверхности изделия подход имеет ряд ограничений. В первую очередь это связано со сложностью точного определения величин теплофизических коэффициентов, входящих в систему уравнений газодинамики. Кроме того модель не учитывает механизм эрозионного испарения материала катода, а использует в качестве начальных данных интегральные характеристики, например, - величину коэффициента электропереноса [2]. На практике испарение материала катода идет в катодных пятнах вакуумной дуги, которые хаотично перемещаются по поверхности катода. Из-за наличия рельефа эродирующей поверхности и внешнего магнитного поля, стабилизирующего разряд на торцевой поверхности катода, направление плазменного столба является случайным. Случайным, также, является количество столкновений конкретного иона потока с частицами технологической среды. В силу названных особенностей протекания процессов в зоне разряда и в области переноса плазмы представляет интерес использовать стохастические методы расчета для их моделирования [3].

Цель данной работы – представить результаты расчетов процессов вакуумного электродугового нанесения покрытий на основе стохастической модели процесса, основанной на методе пробной частицы.

В качестве модельной задачи выбран технологический процесс нанесения покрытий TiN. Материал расходуемого катода ВТ1-0, технологическая среда – азот. Для стабилизации разряда на торцевой поверхности катода конструкция испарителя предусматривает использование соленоида, создающего внешнее коаксиальное магнитное поле. Программирование осуществлялось в среде MATLAB.

Процесс эрозии катода-мишени является дискретным. Новое катодное пятно возникает преимущественно на «бруствере» кратера старого пятна на расстоянии радиуса пятна  $r_k$ . Ближе  $r_k$  нового центра появиться не может. Плотность распределения вероятности возникновения нового катодного пятна при  $X > r_k$  уменьшается по экспоненциальному закону. Наибольшее значение плотности распределения вероятности  $p(X)$  будет иметь при  $X = r_k$ . Новая координата центра катодного пятна может быть рассчитана из уравнения [4]:

$$X = X_0 - \left(\frac{1}{a}\right) \ln(1 - \gamma),$$

где  $a$  - коэффициент диффузии пятна по поверхности электрода, для меди  $a = 2 \times 10^{-3}$  [5]. На рисунке 1 представлена зона эрозии поверхности, полученная в результате расчета траектории движения катодного пятна электродугового разряда (при отсутствии внешних силовых полей). Заданное для расчета количество расчетных шагов соответствует времени разряда равного  $5 \times 10^{-3}$  с. Расчеты проведены для следующих исходных данных:  $r_K = 10^{-3}$  м. Начало координат помещено в точку инициации разряда.

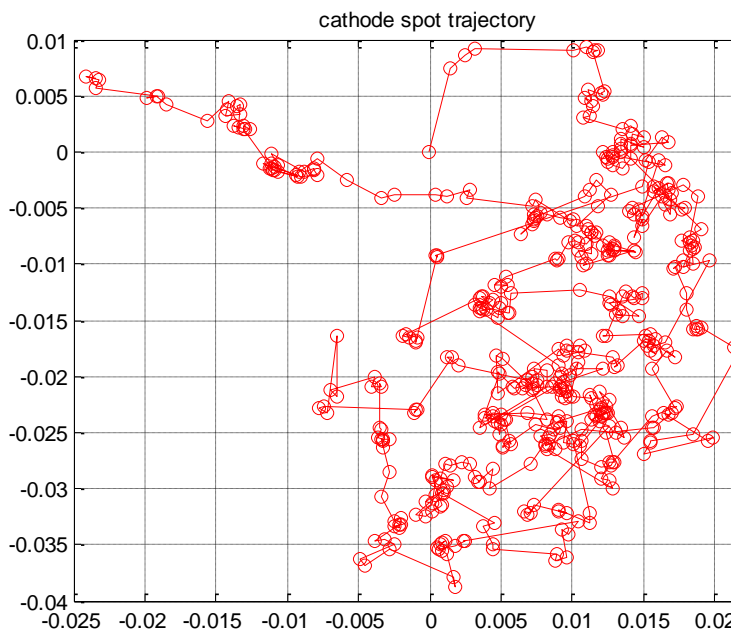


Рисунок 1 - Расчетная траектория единичного катодного пятна (слева). Число расчетных точек 500. Фотография разряда (справа). Экспозиция 1/250.

Внешнее магнитное поле стабилизирует разряд и заставляет двигаться катодное пятно по определенной траектории [6]. Угол отклонения катодного пятна от направления движения сильно зависит от величины внешнего магнитного поля:

$$\alpha = \left(\mu \cdot \pi - \frac{\pi}{2}\right) / d = \frac{\pi}{d} \cdot \left(\mu - \frac{1}{2}\right), \text{ где } d - \text{ положительная константа,}$$

зависящая от величины внешнего магнитного поля. За ось отсчета угла берется ось, совпадающая с направлением вектора магнитного поля  $B_e$ .

В нашем исследовании катодная струя представлена моделью твердого стержня,двигающегося торцом по эродирующей поверхности катода. Для рассмотрения процесса формирования геометрических параметров плазменной струи, необходимо учесть, что направление в пространстве является величиной случайной. Таким образом, для моделирования плазменной струи, покидающей катодное пятно, надо построить набор прямых линий, имеющих случайные значения направляющих косинусов.

Расчетная схема представлена на рисунке 2. Пусть направление плазменной струи в фиксированный момент времени совпадает с отрезком  $|OA|$ .

Координаты  $(x_o, y_o, z_o)$  - координаты эмиссионного центра, находящегося на поверхности катода. Получим основные расчетные уравнения, позволяющие построить в пространстве прямую линию (линию тока плазменного столба катодного пятна). Для этого введем локальную систему координат, центр которой проходит через точку с координатами  $x_o, y_o, z_o$ . Тогда  $x_o = y_o = z_o = 0$  (см. рисунок 2).

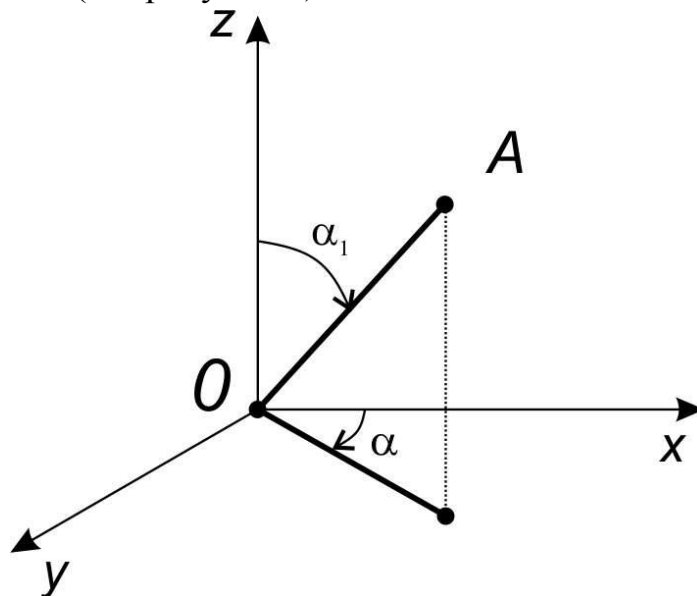


Рисунок 2 – Схема расчета пространственного положения плазменной струи единичного катодного пятна.

Положение отрезка прямой  $|0A|$  в пространстве будет задаваться двумя углами. Угол  $\alpha$  - угол между осью  $OX$  и проекцией отрезка  $|0A|$  на координатную плоскость  $YOX$ . Угол  $\alpha$  является случайной величиной и равен  $\alpha = 2\pi\xi_3$ . Второй угол, задающий положение отрезка  $|0A|$  в пространстве  $\alpha_1$  - угол между отрезком  $|0A|$  и координатной осью  $OZ$ . Угол, определяющий положение  $|0A|$  относительно оси  $OY$   $\alpha_2 = 90^\circ - \alpha$ . Это угол между координатной осью  $OY$  и проекцией отрезка  $0A$  на координатную плоскость  $YOX$ . Угол  $\alpha_1$  является случайной величиной  $\alpha_1 = 2\pi\xi_4$ . Угол  $\alpha_2$  (на рисунке 2 не показан) вычисляется.

Уравнение отрезка  $|0A|$  (как и всей прямой  $0A$ ) имеет вид:

$$\frac{x}{\cos 2\pi\xi_3} = \frac{z}{\cos 2\pi\xi_4} = \frac{y}{\cos(90^\circ - 2\pi\xi_3)}$$

Тогда, задавая переменную  $x$  построим прямую линию.

$$z = \frac{\cos 2\pi\xi_4}{\cos 2\pi\xi_3} * x$$

Третья координата прямой  $|0A|$  вычисляется по формуле:

$$y = \frac{\cos(90^\circ - \alpha)}{\cos 2\pi\xi_3} * x$$

Предложенная методика позволила разработать численный алгоритм формирования параметров плазменной струи единичного катодного пятна. Получено распределение плотности потока по поверхности изделия в сечении перпендикулярном к оси потока.

В результате численного моделирования показано (рис. 3), что в объеме вакуумной камеры потери энергии ионов составляют около 34,6%, около 1% ионов достигают поверхности изделия, не теряя энергии вследствие отсутствия столкновений [7]. Основная доля потерь энергии приходится на ионы,двигающиеся в периферийной области плазменного потока (вдали от оси испарителя). Для условий, когда длина свободного пробега ионов много меньше расстояния от поверхности катода-мишени до поверхности конденсации потока расчетные потери плазменного потока на рекомбинацию составляют 88,6 % ионов, достигших поверхности изделия [8].

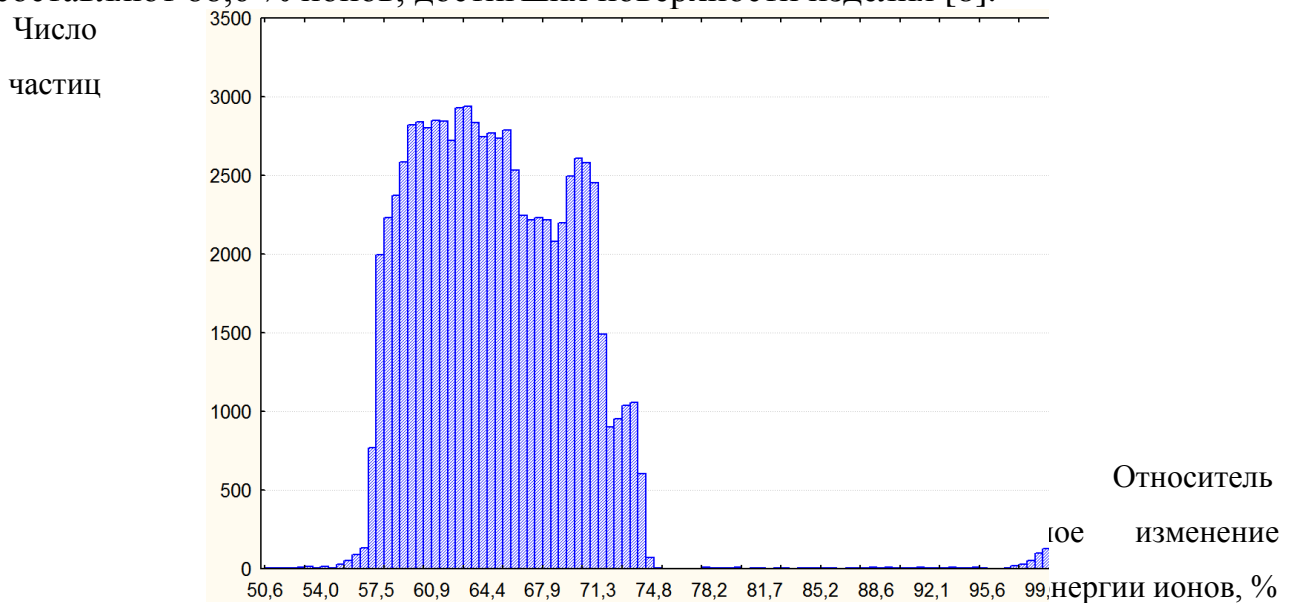


Рисунок 3 – Распределение значений энергии ионов, достигших изделия (расстояние катод-изделие - 500 мм)

Таким образом, вероятностный подход позволяет получить численные значения пространственных и энергетических параметров однокомпонентного потока металлической плазмы,двигающейся в среде технологического газа.

### Список использованных источников

1. Плазменно-вакуумные покрытия/ Под общ.ред. Ж.А. Мрочека.- УП Технопринт: Минск.- 2004.- 346 с.

2. Иванов И.А. Проблемы математического моделирования движущихся газовых сред//В сбор. Матер. 5-й междуна. н.-т. конф. «Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь», Минск: БНТУ, 2011, часть 1, с. 38-43

3. Иванов И.А., Валецкий Д.В, Касинский Н.К Стохастические подходы к проектированию процессов вакуумно-термического формирования наноструктурных покрытий// Литье и металлургия.-2017.- 2 (87), С. 76 - 80

4. Иванов И.А. Применение метода Монте-Карло к расчету траектории движения катодного пятна вакуумной дуги// Матер. 15-й Междуна. н.-т. конф. (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). – Минск, 2017 – Том 1. – С. 394.

5. Забелло К.К. Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи// дисс. на соискание уч. степени к.физ.-мат. наук/ Санкт-Петербург, 2015

6. Иванов И.А. Применение стохастического моделирования и расчеты траектории движения катодного пятна электрической дуги //5-я междуна. н.-т. интернет-конф., Информационные технологии в образовании, науке и производстве 18-19 ноября 2017г. (электронный ресурс).- (Б.и.), <http://www.bntu.by/images/stories/mido/ntik5/ivanov1.pdf>, 2017.

7. Ivanou I. The numerical simulation of a cathode spot motion in a tangential magnetic field// Mater. of Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Sept. 2018.- Minsk: Kovcheg.- P. 65 - 67