

## Применение стохастического моделирования к расчету траектории движения катодного пятна электрической дуги

Иванов И. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь  
[ihar-ivanou@yandex.ru](mailto:ihar-ivanou@yandex.ru)

*В работе описан алгоритм расчета траектории движения единичного катодного пятна вакуумной электрической дуги в случае отсутствия внешнего магнитного поля с учетом стохастического характера перемещения пятна. Предложенный алгоритм расчета позволяет не привязываться к временным параметрам процесса. Расчет траектории состоит в выборе случайного направления движения катодного пятна и расчета расстояния, на которое пятно перемещается за один шаг.*

*The algorithm for calculating of a single cathode spot trajectory of a vacuum electric arc without of out magnetic fields with considering the stochastic nature of the spot motion is described in this paper. This algorithm dose not uses the time parameters of the process. Calculation of the trajectory involves selecting a random motion direction of the spot and calculating the motion distance of the spot in one step.*

Электродуговая обработка поверхности металлических изделий, таких как катанка, проволока, отливки достаточно эффективно используется в машиностроении и металлургическом промышленности. Очистка поверхности от оксидов и других загрязнений происходит в результате их разрушения и испарения с поверхности в катодных пятнах электрической дуги, хаотично перемещающихся по поверхности обрабатываемого изделия, на которое подается отрицательный потенциал смещения. Эффективность данного вида очистки поверхностей резко возрастает при проведении процесса в вакууме [1]. Хаотичность движения катодных пятен приводит к тому, что они могут двигаться как по неочищенным, так и по уже очищенным поверхностям детали. Это приводит к уменьшению производительности процесса и неконтролируемому нагреву поверхности обрабатываемого изделия. Для разработки методов управления траекторией и скоростью движения катодного пятна, а также оценки объема материала испаряемого с поверхности необходимо иметь расчетные алгоритмы, позволяющие определять траекторию перемещения катодного пятна по обрабатываемой поверхности.

Цель данной работы – разработать алгоритм расчета траектории движения единичного катодного пятна вакуумной электрической дуги в случае отсутствия внешнего магнитного поля с учетом стохастического характера перемещения пятна.

При использовании для очистки поверхности изделий дугового разряда, протекающего при давлении менее  $10^{-2}$  Па, необходимо учитывать, что при данном давлении необходимая среда, достаточная для электрического пробоя и поддержания устойчивого горения дуги, образуется за счет эрозии обрабатываемой поверхности изделия. Эта эрозия протекает в катодных пятнах. Время жизни катодного пятна колеблется от десятых долей до десятков микросекунд. Взамен отмирающего пятна на некотором расстоянии от него (как правило, это расстояние приблизительно равно половине диаметра катодного пятна) образуется новое пятно. Это приводит к дискретному (скачкообразному) перемещению зоны разряда вакуумной дуги и носит название - движение катодного пятна. Скорость перемещения катодного пятна достигает  $10^2$  м/с.

Взамен отмирающего катодного пятна новое пятно возникает на «бруствере» кратера старого пятна, то есть на расстоянии радиуса катодного пятна  $r_k$ , или на большем расстоянии от центра отмершего катодного пятна. Ближе  $r_k$  нового центра появиться не может [2]. Плотность распределения вероятности возникновения нового катодного пятна при  $X > r_k$  уменьшается по экспоненциальному закону.

Графически закон распределения (плотность распределения вероятности) может быть представлен в виде ломаной кривой (рис. 1), на которой  $p(X) = 0$  если расстояние между центрами старого (отмирающего) и вновь рождающегося катодных пятен меньше радиуса катодного пятна. Наибольшее значение функция  $p(X)$  будет иметь при  $X = r_k$ . С увеличением расстояния между центрами старого и нового катодного пятна вероятность возникновения второго резко падает.

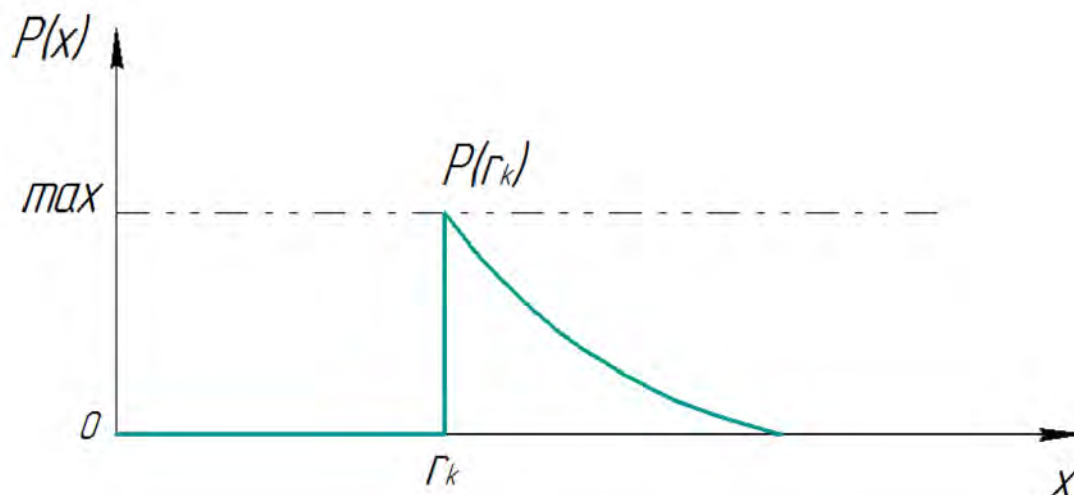


Рисунок 1 - График распределения вероятности возникновения нового катодного пятна на расстоянии  $X$  от центра отмершего пятна.

Зададим закон распределения плотности вероятности  $p(X)$ . Для начала рассмотрим, в общем виде, случайную величину, подчиняющуюся экспоненциальному закону распределения. Для неё справедливо:

$$p(X) = a e^{-a(X-X_0)} \quad (1)$$

Тогда функция распределения  $F(X)$  будет иметь вид:

$$F(X) = \gamma = \int_{X_0}^X a e^{-a(X-X_0)} dX = 1 - e^{-a(X-X_0)} \quad (2)$$

Преобразуем последнее уравнение, разрешив его относительно  $X$ . Физический смысл величины  $a$  пока не уточняем. В соответствии со свойствами функции  $F(X)$  величину  $\gamma$  рассматриваем как некоторое случайное число, лежащее на отрезке от нуля до единицы. Данное число характеризует вероятность возникновения нового катодного пятна на расстоянии  $X$  от центра отмирающего.

$$X = X_0 - \frac{1}{a} \ln(1 - \gamma) \quad (3)$$

Последнее уравнение задает новую координату центра катодного пятна. В самом общем случае эта координата должна зависеть от времени горения дуги и квадрата смещения катодного пятна по поверхности катода. В качестве коэффициента  $a$  следует рассмотреть коэффициент диффузии пятна по поверхности электрода (обрабатываемого изделия). В данном подходе можно не привязываться к временным параметрам процесса. Моделирование процесса будет состоять в выборе: а) направления движения катодного пятна; б) расстояния, на которое пятно перемещается за один шаг. Независимо от скорости движения катодного пятна по поверхности электрода, пятно меняет своё положение дискретно на расстояние, которое вычисляется по формуле 3.

В данной работе для разработки расчетного алгоритма использовали пакет прикладных программ объектно-ориентированного программирования MATLAB версии 2007a. [3]. Величину коэффициента диффузии брали из работы [4] для меди  $D = 2 \times 10^{-3}$ . На рисунке 2 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 0,5 с. Расчеты проведены для следующих исходных данных:  $r_k = 10^{-3}$  м. Направление дискретного движения единичного катодного пятна определяли по формуле:

$$\varphi = 2\pi \times k, \quad (4)$$

где  $k$  – число от 0 до 1, получаемое с помощью генератора случайных чисел (процедура рандомизации `rand`). Начало координат помещено в точку инициации разряда. Ниже приведен листинг расчетного алгоритма.

```
>> D=0.002;%задание исходных данных
>>xo=0;x(0)=0;
>>yo=0;y(0)=0;
>>rk=0.001;
>>fori=1:50000%оператор расчета координаты нового эмиссионного центра
r=rk+D*log(1-rand);%расчет расстояния на которое переместится пятно
phi=2*pi*rand;%процедура рандомизации
x1=xo+r*cos(phi);x(i)=x1;%определение новой координаты катодного пятна
y1=yo+r*sin(phi);y(i)=y1;
xo=x1;yo=y1;
end
plot(x,y,'or-')%вывод данных на печать
grid on
>>title('траекториякп')
```

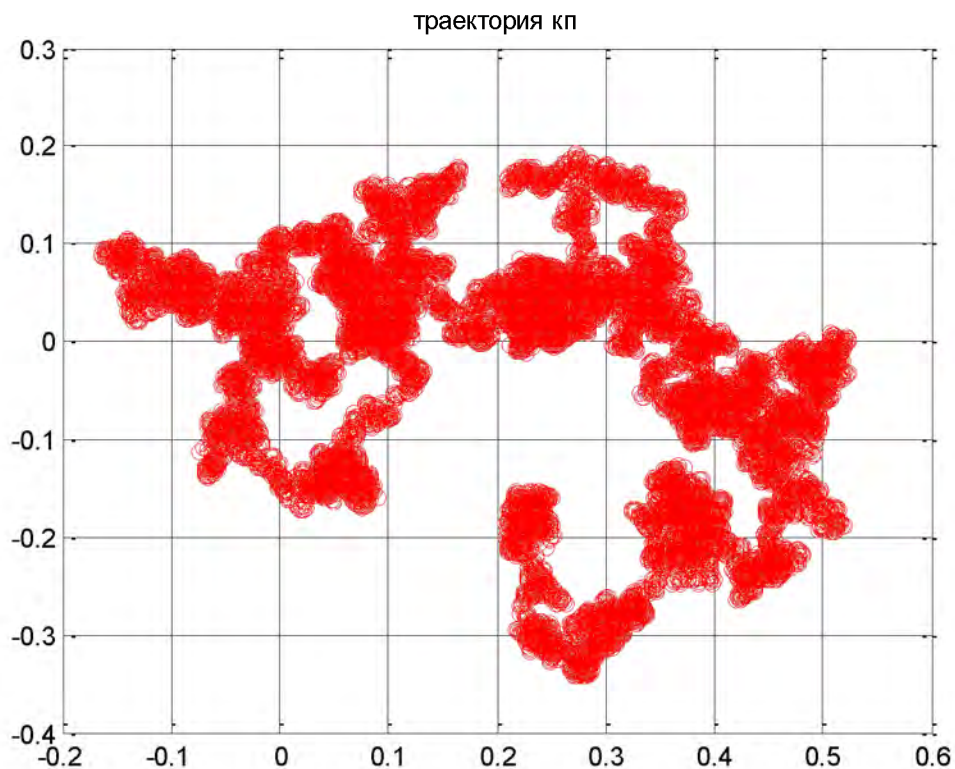


Рисунок 2 - Расчетная траектория единичного катодного пятна. Время разряда  $5 \times 10^{-4}$  с.

Таким образом, использование метода Монте-Карло к расчету траектории катодного пятна позволяет учитывать дискретный характер перемещения пятна. Предложенный расчетный алгоритм не требует привязывать расчет к временным параметрам процесса.

Моделирование процесса состоит в выборе случайного направления движения катодного пятна и расчета расстояния, на которое пятно перемещается за один шаг.

#### Список литературы

1. Потемкин, Г.В. Изменение структуры и фазового состава нелегированной стали в зоне термического влияния катодных пятен вакуумной дуги/ Г.В.Потемкин, В.В.Демиденко, Е.П.Найден, Ю.П.Егоров, М.В.Журавлев, Г.Е.Ремнев// Физика и химия обработки материалов.- 2014.- №4.- с.28-34
2. Плазменно-вакуумные покрытия/ Под общ.ред. Ж.А. Мрочека.- УП Технопринт: Минск.- 2004.- 346 с.
3. Кетков, Ю.Л. MATLAB 6.x: Программирование численных методов / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М. М. Шульц. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 672с.
4. 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