

УДК 53.06

Профиль выработки катода торцевого вакуумно-дугового испарителя с вращающимся арочным магнитным полем

Наткина О. С., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

Научный руководитель: Духопельников Д. В., к.т.н, доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

duh@power.mstu.ru

Введение. Вакуумно-дуговые испарители широко применяются для осаждения сверхтвердых упрочняющих, защитных и других функциональных покрытий [1]. При прочих достоинствах, метод вакуумно-дугового осаждения имеет существенный недостаток – наличие в потоке плазмы микрокапельной фазы с размером капель от 0.1 до 10 мкм. Современная технология вакуумно-дугового осаждения покрытий требует снижения доли капельной фазы и размеров капель в продуктах эрозии катода, а также повышения коэффициента использования материала катода. Одним из путей решения этой проблемы является использование дуговых испарителей с управлением движением катодного пятна арочным магнитным полем [2].

Идея управления движением катодного пятна с помощью арочного магнитного поля впервые была высказана в работе Кесаева И.Г. и Пашковой В.В [3]. В такой системе катодное пятно движется внутри арки, образованной магнитными силовыми линиями, в области, где нормальная к катоду составляющая магнитного поля равна нулю. Для снижения доли капельной фазы необходимо увеличивать скорость движения катодного пятна по поверхности катода, что достигается путем увеличения индукции арочного магнитного поля [4]. Однако это ведет к уменьшению ширины зоны эрозии, которая превращается в узкую канавку [5]. При этом уменьшается эффективность использования материала катода и увеличивается неравномерность его выработки.

Для устранения неравномерности выработки применяют системы, позволяющие периодически смещать траекторию катодного пятна по поверхности катода. В работе [5] использовалась магнитная система, создававшая арочное магнитное поле переменной конфигурации с помощью изменения соотношения токов в катушках магнитной системы.

Альтернативным методом смещения траектории катодного пятна является вращение магнитной системы со смещением относительно оси катода дугового испарителя (рис. 1).

Описание модели. Расчет производился для вакуумно-дугового испарителя с торцевым цилиндрическим катодом. Предполагаемая магнитная система на постоянных магнитах устанавливается со смещением a относительно оси катода и создает арочное магнитное поле, обеспечивающее движение катодного пятна по окружности радиуса R_{MC} (рис.1).

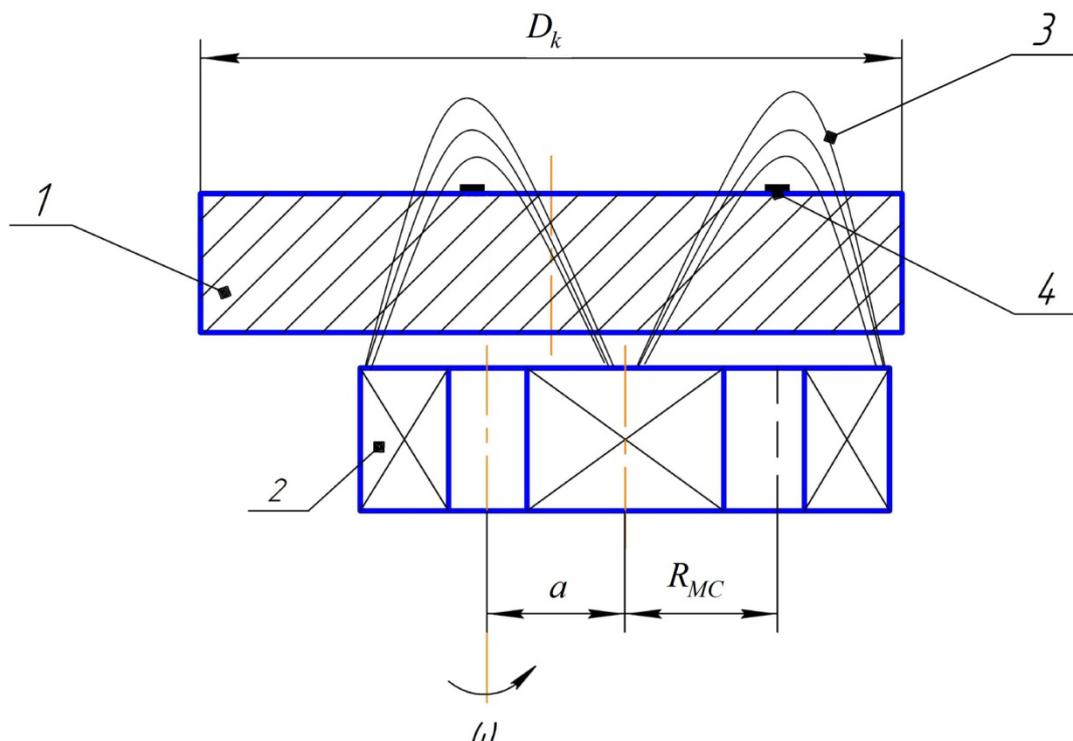


Рис. 1. Схема магнитной системы дугового испарителя с вращающимся арочным магнитным полем: 1 – катод, 2 – магнитная система, 3 – конфигурация магнитных силовых линий, 4 – положение катодной привязки.

a – эксцентриситет; R_{MC} – радиус вращения катодного пятна; D_k – диаметр катода

При вращении магнитной системы вокруг центра катода траектория движения катодного пятна постоянно изменяется, описывая траекторию, схематично представленную на рис. 2. Результирующая траектория движения катодного пятна складывается из его движения в арке магнитного поля ($V_{КП}$) и движения этой арки вокруг центра катода (V_{MC}). В такой схеме катодное пятно двигается по всей поверхности катода, в результате чего можно ожидать более высокий коэффициент использования материала, чем в случае с неподвижной магнитной системой.

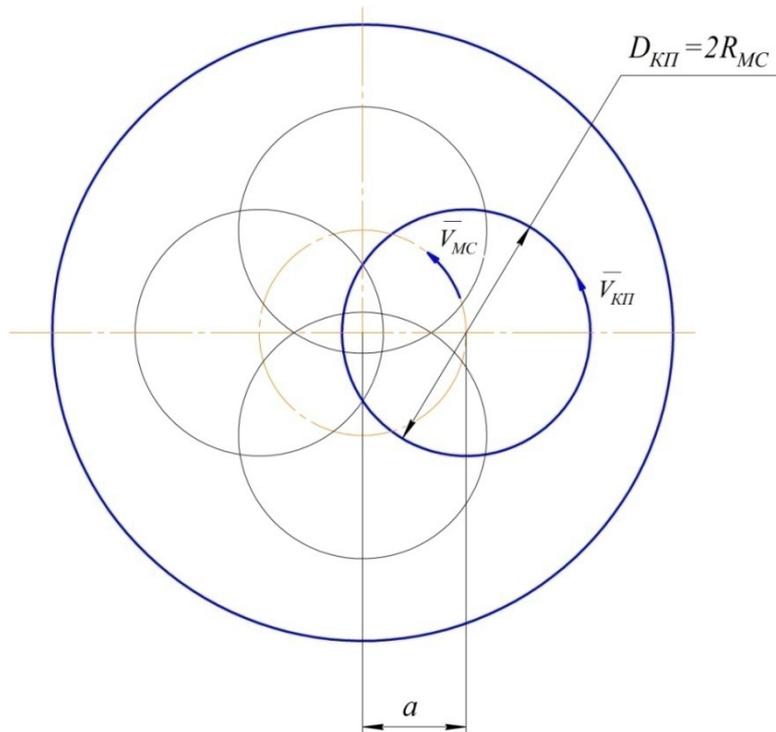


Рис. 2. Схематическое изображение траектории движения катодного пятна в аномальном магнитном поле при вращении магнитной системы: $R_{МС}$ - радиус вращения катодного пятна; D_k - диаметр катода; a - эксцентриситет; $V_{МС}$ - скорость магнитной системы; $V_{кп}$ - скорость катодного пятна

Расчет распределения силовых линий магнитного поля над поверхностью катода проводился в фиксированном положении магнитной системы в программе Infolityca MagNet v.7.1 методом конечных элементов. Полученная конфигурация силовых линий представлена на рис. 3.

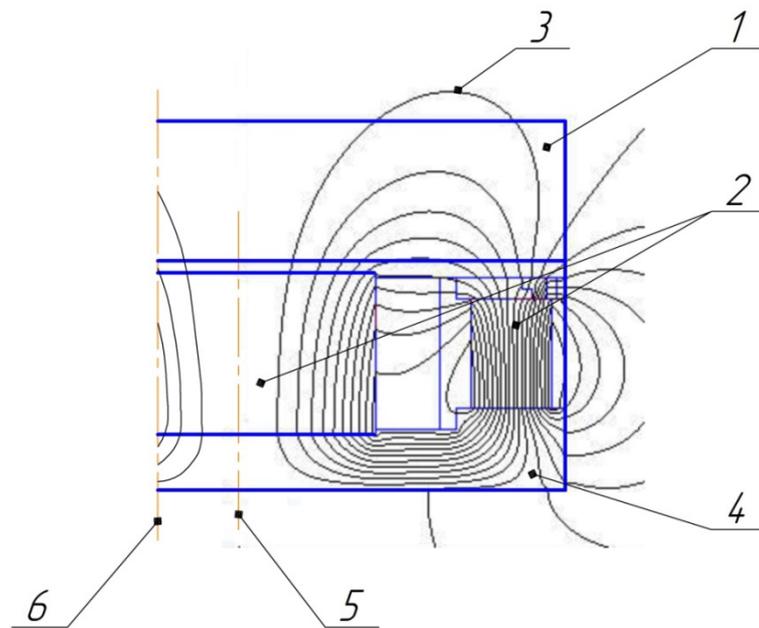


Рис. 3. Конфигурация силовых линий арочного магнитного поля: 1 – катод, 2 – магнитная система, 3 – конфигурация магнитных силовых линий, 4 – магнитопровод, 5 – ось магнитной системы, 6 – ось катода

Распределения абсолютной, тангенциальной и нормальной составляющей индукции магнитного поля по радиусу катода представлено на рис. 4.

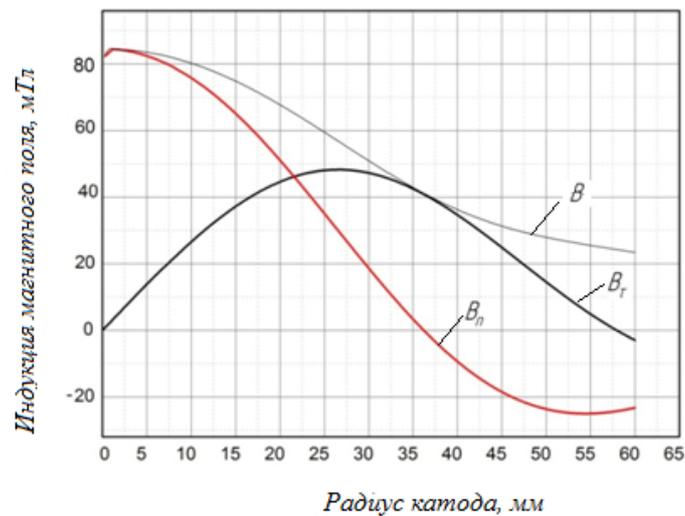


Рис. 4. Распределение величины магнитного поля B и ее тангенциальной B_{τ} и нормальной B_n составляющих по радиусу катода

Профиль выработки катода в описанной системе можно оценить из предположения, что катодное пятно, вращаясь в неподвижном арочном магнитном поле, создаёт в каждый момент времени элементарную выработку, профиль которой описывается кривой Гаусса. При перемещении арочного магнитного поля положение дорожки катодного пятна смещается, образуя новые элементарные выработки. Профиль конечной выработки будет суммой профилей элементарных выработок.

Чтобы получить профиль элементарной выработки, образованной движением катодного пятна в каком-то мгновенном неподвижном положении магнитной системы, нам необходимо знать положение катодного пятна на поверхности катода R_i и ширину зоны выработки W . Мгновенное положение катодного пятна R_i в каждый момент времени можно найти, зная уравнение движения катодного пятна по поверхности катода. Ширину дорожки можно оценить, воспользовавшись данными, приведёнными в [6].

Траектория движения катодного пятна при описанном выше сложном движении определяется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} x(t) = R \cdot \sin(\omega_{\text{кп}} + \omega_{\text{мс}}) \cdot t + a \cdot \cos \omega_{\text{кп}} \cdot t \\ y(t) = a \cdot \sin \omega_{\text{кп}} - R \cdot \cos(\omega_{\text{кп}} + \omega_{\text{мс}}) \cdot t, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_{\text{кп}}$ – угловая скорость движения катодного пятна, $\omega_{\text{мс}}$ – скорость вращения магнитной системы, R – радиус вращения катодного пятна относительно центра магнитной системы, a – эксцентриситет.

Для расчета траектории движения катодного пятна зададим следующие параметры:

1. Скорость вращения магнитной системы $\omega_{\text{мс}} = 3$ об/мин;
2. Радиус вращения катодного пятна $R_{\text{мс}} = 36$ мм;
3. Эксцентриситет $a = 25$ мм;
4. Индукция магнитного поля $B = 5$ мТл;
5. Ток разряда $I = 100$ А.

Угловая скорость движения катодного пятна:

$$\omega_{\text{кп}} = V_{\text{кп}}/R_{\text{мс}} = 30.5 \text{ об/мин},$$

где $V_{\text{кп}} = 11$ м/с - скорость катодного пятна при принятых выше токе разряда и индукции магнитного поля [2].

Профиль выработки, образующийся при неизменном арочном магнитном поле, аппроксимированный кривой Гаусса приведён на рис.5. Ширина зоны выработки W увеличивается с ростом тока разряда и уменьшается с увеличением касательной составляющей индукции магнитного поля. Таким образом для расчета профиля выработки катода в фиксированном положении магнитной системы необходимо задать ток разряда I_p , величину индукции касательной составляющей арочного магнитного поля, а также знать положение центра арки магнитного поля R_i .

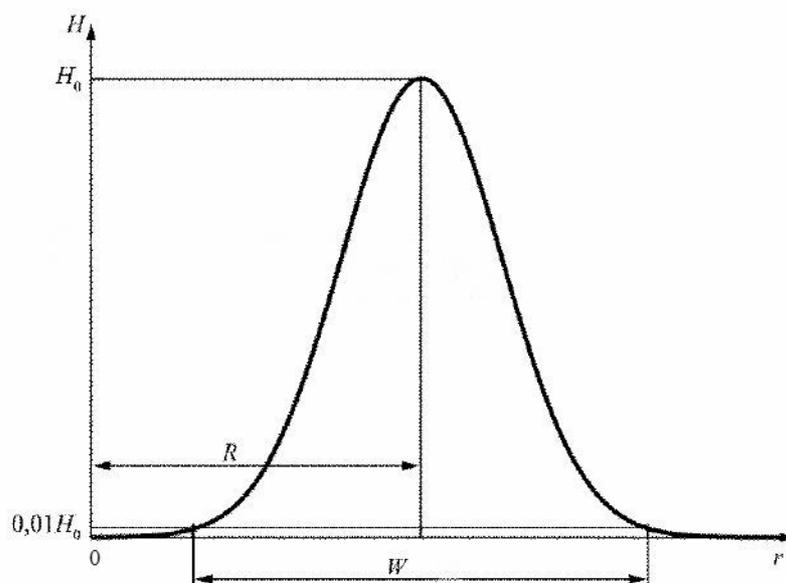


Рис. 5. Профиль выработки катода в арочном магнитном поле, аппроксимированный кривой Гаусса: H_0 – максимальная глубина выработки; R – координата максимума выработки; W – ширина зоны выработки

При токе разряда $I_p = 100 \text{ A}$ и индукции магнитного поля $B = 50 \text{ Гс} = 5 \text{ мТл}$ в центре арочного магнитного поля, получаем ширину выработки:

$$W = a(I) \cdot B(I)^{-b(I)} = 129.5 \cdot 50^{-0.5} = 18.5 \text{ мм}$$

Профиль выработки описывается выражением:

$$H(r) = H_0 \cdot \exp \left[-\frac{(r-R)^2}{W^2} \right],$$

где R – пересечение траектории (1) катодного пятна с осью OX ;

W - ширина выработки;

H_0 – глубина выработки.

Для определения профилей элементарных выработок необходимо найти точки пересечения траектории движения катодного пятна с осью ОХ. Для этого необходимо вычислить корни уравнения (1) и в полученных точках провести расчет по уравнению (2):

$$H_{\Sigma}(r) = H_0 \sum_i \exp \left[-\frac{(r-R_i)^2}{W^2} \right] \quad (2)$$

Суммарную выработку катода находим при условии, что мгновенное положение катодного пятна R_i соответствует корням уравнения (1).

Полученная с помощью выражения (2) нормированная зависимость глубины суммарной выработки от радиуса катода приведена на рис. 7:

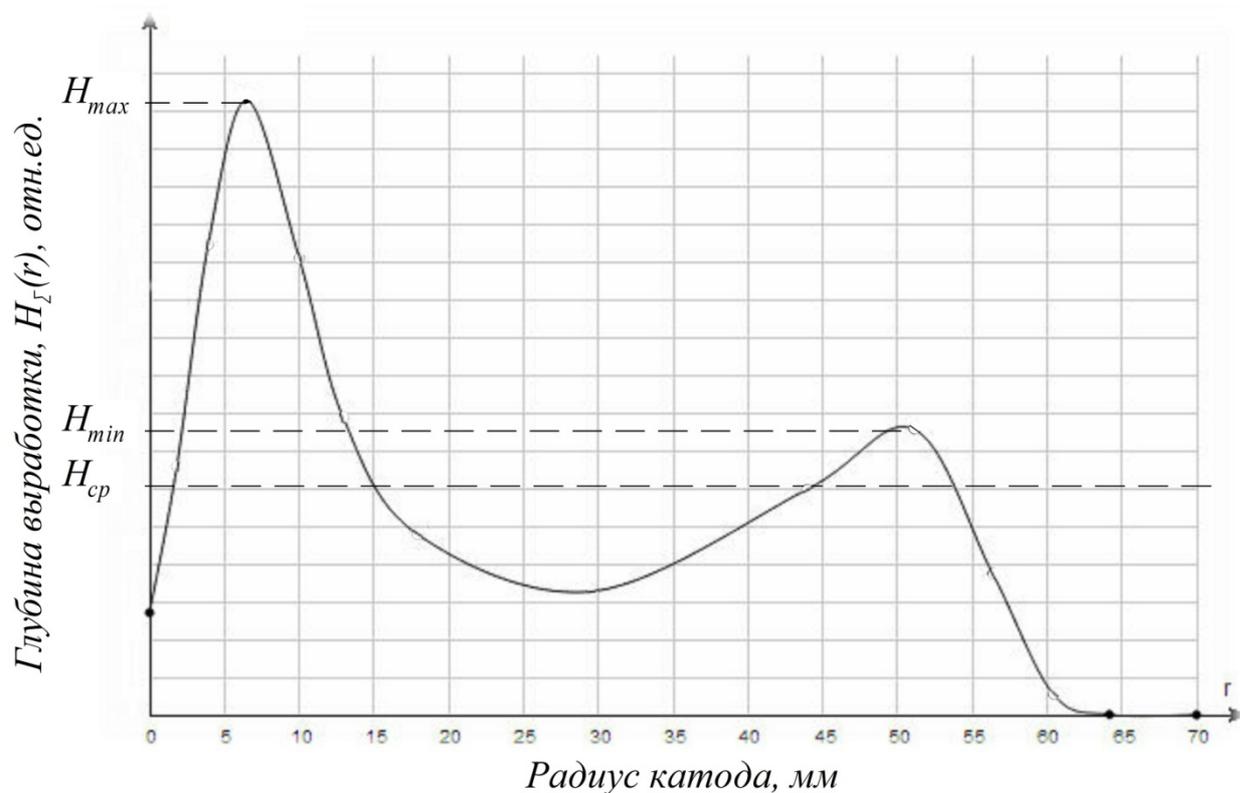


Рис. 7. Суммарный профиль выработки катода при вращении арочного магнитного поля со смещением

Обсуждение

Приведенная на рис. 7 кривая описывает выработку катода дугового испарителя с вращающимся арочным магнитным полем. В центральной области катода и на периферии формируются зоны повышенной эрозии, причём эрозия в центральной части катода больше. Глубина канавки в этой области в 2.7 раз больше, чем средняя глубина выработки и в 2 раза больше, чем глубина выработки на периферии.

Можно оценить степень неравномерности выработки катода как отношение разности между максимальной и минимальной глубины выработки к средней глубине выработки:

$$\delta = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{cp}} \cdot 100\% = 18,5\%,$$

где H_{max} - максимальная глубина выработки катода;

H_{min} - минимальная глубина выработки катода;

H_{cp} - средняя глубина выработки катода.

Также можно оценить коэффициент использования материала катода, который рассчитывается как отношение объема выработанного материала к объему всего катода:

$$КИМ = \frac{V_{исп}}{V_{\Sigma}} \cdot 100\% = 30\% ,$$

где $V_{исп}$ - объем выработанного материала катода;

V_{Σ} - суммарный объем материала катода.

При определении максимальной выработки материала было учтено, что минимальная толщина катода, которая обеспечивает его механическую прочность, должна быть не менее 3мм.

Профиль выработки катода, показанный на рис.7, получен в безразмерном нормированном виде. Для получения реальной глубины выработки необходимо знать коэффициент эрозии катода и его плотность. Таким образом, можно проводить оценку параметров работы дугового испарителя без необходимости его изготовления.

Выводы:

Проведенные расчеты показали, что в дуговом испарителе с вращающимся ародным магнитным полем в центральной и периферийной зонах катода формируются области с повышенной эрозией и, следовательно, с большой глубиной выработки. Неравномерность выработки катода в описанной схеме составляет 18.5%. Коэффициент использования материала катода при этом имеет величину около 30%. Для увеличения коэффициента использования материала необходима разработка систем с иной траекторией движения катодного пятна, которая обеспечит его длительное нахождение в средней и периферийной областях катода.

Список литературы

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2005. 236 с.
2. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле. Инженерное образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 1. DOI:77-30569/256359.
3. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // Журнал технической физики. 1959. Т. 29, № 3. С. 287-298.
4. Духопельников Д.В., Марахтанов М.К., Береговский В.В., Щуренкова С.А. зависимость параметров капельной фазы впокрытиях в зависимости от скорости движения катодного пятна вакуумной дуги // 14-я международная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика»: материалы (Санкт-Петербург, 17-20 апреля 2012 г.). СПб.: изд-во Политехн.ун-та, 2012 г. В.2 ч. Ч. 2. С. 22-27.
5. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с а рочным магнитным полем. Инженерное образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0482485.
6. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А., Наинг Чжо Вин. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя. Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html> (дата обращения 15.05.14).