

Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя

© Д.В. Духопельников, Д.В. Кириллов,
В.А. Рязанов, Чжо Вин Наинг

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

Проведен анализ профиля выработки катода в торцевом дуговом испарителе с арочным магнитным полем и управляемой траекторией движения катодного пятна. Получены зависимости для определения неравномерности выработки катода. Профиль выработки катода при фиксированном положении траектории катодного пятна аппроксимировался кривой Гаусса. Общий профиль выработки катода определялся суммированием профилей выработки, полученных при смещении траектории на заданный шаг. Найден оптимальный шаг смещения катодного пятна по радиусу: он соответствует 1/3 ширины зоны выработки при фиксированном положении траектории катодного пятна. При этом неравномерность выработки катода составляет менее 3 %.

Ключевые слова: вакуумная дуга, катодное пятно, вакуумно-дуговой испаритель, выработка, ресурс, коэффициент использования материала.

Введение. Современные технологии нанесения вакуумно-дуговых покрытий предполагают использование дуговых испарителей с управляемым движением катодного пятна в арочном магнитном поле [1–3]. При этом увеличение индукции магнитного поля позволяет значительно снизить массовую долю и размер капель в продуктах эрозии катода и улучшить характеристики покрытия [4, 5]. Однако при увеличении индукции арочного магнитного поля уменьшается зона выработки, превращаясь в узкую канавку [6]. Это приводит к существенной неравномерности выработки материала катода и снижению коэффициента использования материала катода.

Выравнивание профиля выработки катода можно осуществлять двумя способами:

1) изменять кривизну линий арочного магнитного поля (и, следовательно, форму траектории движения катодного пятна);

2) перемещать относительно катода саму магнитную систему, выполненную, как правило, на постоянных магнитах (при этом кривизна линий магнитного поля не изменяется).

Сложность заключается в выборе оптимального закона перемещения траектории катодного пятна по поверхности катода и в подборе оптимального шага смещения катодного пятна по радиусу.

В работе [6] изучалось влияние значения индукции арочного магнитного поля на ширину и форму выработки катода дугового испарителя. Дуговой испаритель был оснащен электромагнитной системой, состоящей из двух катушек, которая создает на поверхности катода арочное магнитное поле и позволяет изменять значение и распределение магнитного поля на поверхности катода. Меняя соотношение токов в катушках магнитной системы, можно было изменять кривизну линий арочного магнитного поля и радиус кругового движения катодного пятна (рис. 1). Подобные схемы достаточно просто реализовать с помощью современных микропроцессорных систем управления питанием магнитных катушек.

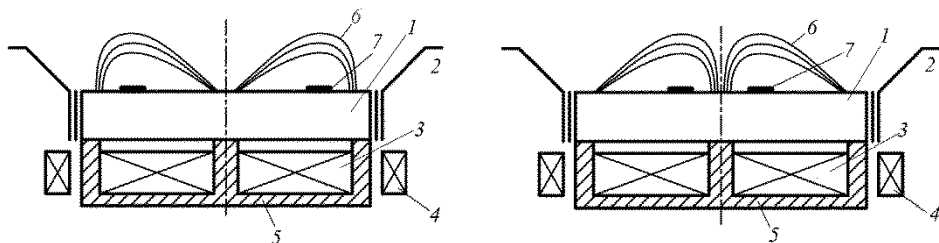


Рис. 1. Различные конфигурации магнитных силовых линий для управления положением катодного пятна:

1 — катод; 2 — анод; 3, 4 — магнитные катушки; 5 — магнитопровод; 6 — магнитные силовые линии; 7 — положение катодного пятна

Катодное пятно в выбранном режиме (при неизменном соотношении токов в электромагнитных катушках) двигалось по окружности определенного диаметра, вырабатывая материал катода и создавая профиль выработки. На рис. 2 приведены типичные траектории движения катодного пятна.

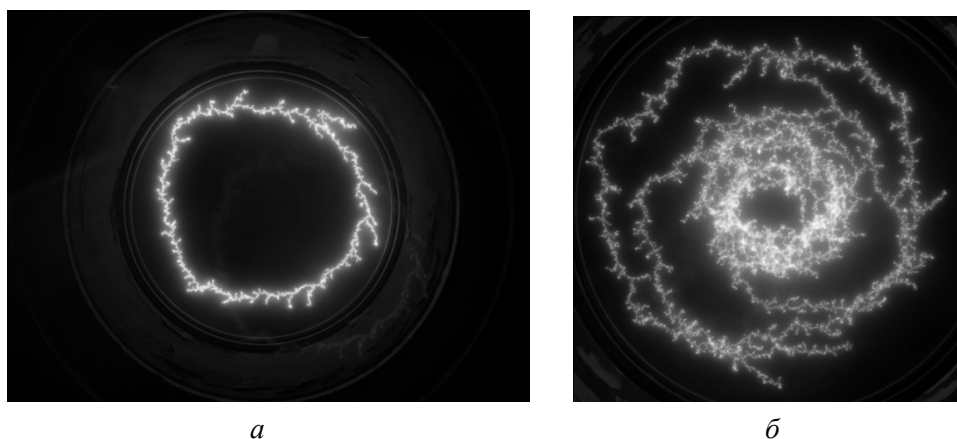


Рис. 2. Траектории движения катодного пятна (ток разряда $I_p = 100$ А, индукция магнитного поля $B = 5$ мТл):

a — фиксированное положение катодного пятна; *б* — сканирование поверхности катода катодным пятном

Было показано, что при неизменном арочном магнитном поле профиль выработки катода хорошо описывается кривой Гаусса. Ширина дорожки движения катодных пятен изменяется с увеличением тока разряда от 80 до 200 А и индукции магнитного поля от 1,3 до 13,8 мТл. Ширина зоны выработки увеличивается с ростом тока разряда и уменьшается с увеличением касательной составляющей индукции магнитного поля. Изменение ширины происходит по степенному закону.

В настоящей работе на основе этих данных построена математическая модель профиля выработки катода при перемещении траектории движения катодного пятна по поверхности катода и даны рекомендации по выбору шага перемещения этой траектории.

Экспериментальные данные. Экспериментальные данные для ширины дорожки катодных пятен, полученные в [6], показаны на рис. 3. Зависимость ширины выработки W от индукции магнитного поля B может быть аппроксимирована степенной функцией:

$$W = a(I)B^{-b(I)}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} a(I) &= 100 + 0,4 \exp(0,043I), \\ b(I) &= 0,457 + 0,002 \exp(0,03I). \end{aligned} \quad (2)$$

Как было показано в [6], при неизменном арочном магнитном поле профиль кольцевой выработки катода $H(r)$ хорошо описывается кривой Гаусса (рис. 4), которая определяется максимальной глубиной выработки H_0 и средним квадратическим отклонением σ , соответствующим глубине выработки $H_0/\exp(0,5)$:

$$H(r) = H_0 \exp\left[-\frac{(r-R)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

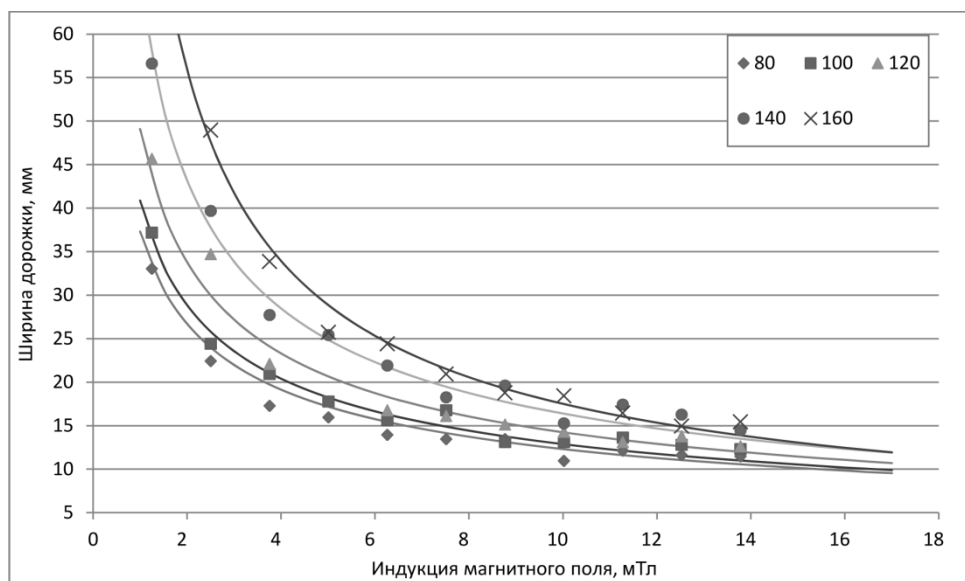
где R — радиус максимальной выработки.

Половина ширины зоны выработки W будет соответствовать расстоянию от максимума выработки R до радиуса, на котором глубина выработки $H(r) = 0,01H_0$. При этом ширина зоны выработки

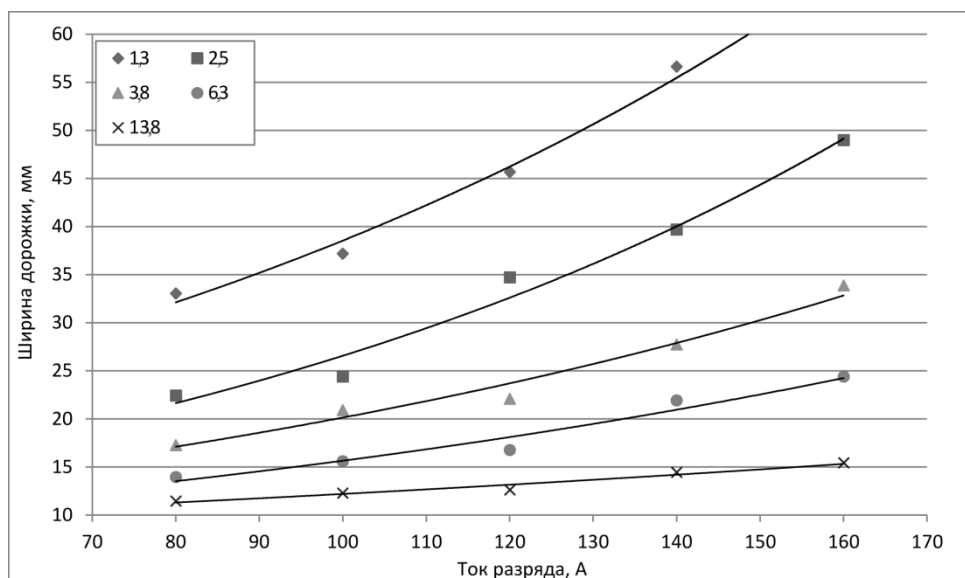
$$W = 6\sigma. \quad (4)$$

Суммарный профиль выработки катода. Опираясь на полученные в [6] экспериментальные данные, можно построить математическую модель профиля выработки катода при перемещении траектории движения катодного пятна по поверхности катода (см. рис. 2, б).

В нашем случае это будет изменение радиуса кругового движения катодного пятна на определенное расстояние Δr , которое в свою очередь должно выбираться в зависимости от режима работы дугового испарителя.



а



б

Рис. 3. Зависимость ширины дорожки катодных пятен:

а — от индукции магнитного поля (ток разряда I_p , А, указан в рамке); б — от тока разряда (индукция магнитного поля B , мТл, указана в рамке)

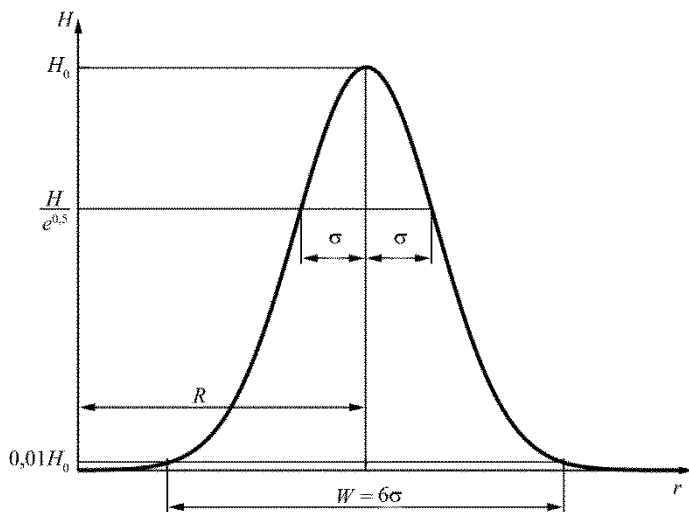


Рис. 4. Кривая Гаусса, описывающая профиль выработки катода:

H_0 — максимальная глубина выработки; R — радиус максимальной выработки; σ — среднее квадратическое отклонение; W — ширина зоны выработки

При многократном смещении радиуса кругового движения катодного пятна на расстояние Δr профиль выработки катода $H_\Sigma(r)$ будет являться суммой профилей выработки $H_i(r)$, полученных при фиксированной траектории движения катодного пятна с радиусом R_i :

$$H_\Sigma(r) = \sum_i H_i(r) = \sum_i H_{0i}(R_i) \exp\left[-\frac{(r - R_i)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5)$$

где $R_i = R + i\Delta r$.

Если считать, что максимальная глубина выработки $H_{0i}(R_i)$ одинакова для всех траекторий с радиусом R_i и равна H_0 , то для суммарного профиля можно записать

$$H_\Sigma(r) = H_0 \sum_i \exp\left[-\frac{(r - R_i)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (6)$$

Пример профиля, рассчитанного по выражению (6), показан на рис. 5. Неравномерность выработки δ на участке от R_1 до R_2 будем определять как

$$\delta = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\langle H \rangle}, \quad (7)$$

где H_{\max} и H_{\min} — максимальная и минимальная глубина выработки;

$\langle H \rangle = \frac{1}{R_2 - R_1} \int H_\Sigma(r) dr$ — средняя глубина выработки.

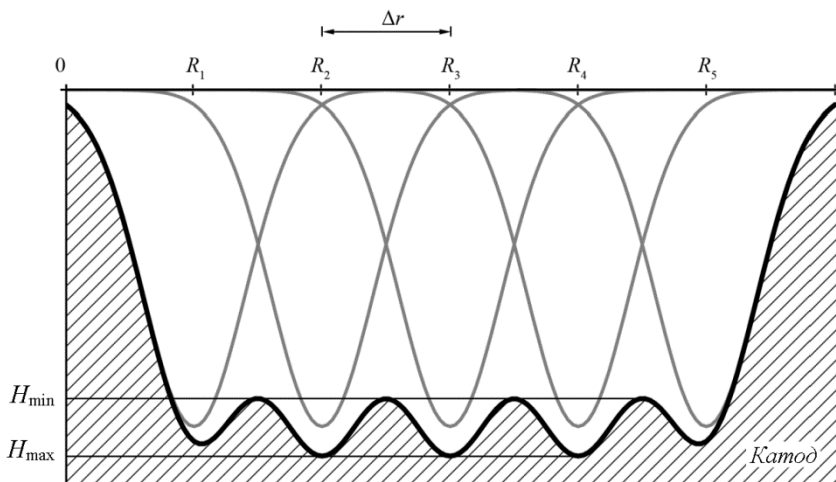


Рис. 5. Профиль выработки катода при дискретном изменении радиуса движения катодных пятен на Δr

Для оценки влияния шага перемещения катодного пятна Δr на неравномерность выработки катода удобно использовать безразмерную величину k , которая показывает, насколько отличается шаг перемещения от среднего квадратического отклонения профиля выработки:

$$k = \frac{\Delta r}{\sigma}. \quad (8)$$

Будем называть эту величину относительным шагом перемещения траектории катодного пятна. Очевидно, что увеличение значения k приведет к росту неравномерности выработки катода.

Из рис. 6 видно, что неравномерность выработки катода менее 3 % можно получить, если k не превышает значения 2. Таким образом, для обеспечения хорошей равномерности выработки катода смещение траектории катодного пятна должно быть не более 1/3 ее ширины.

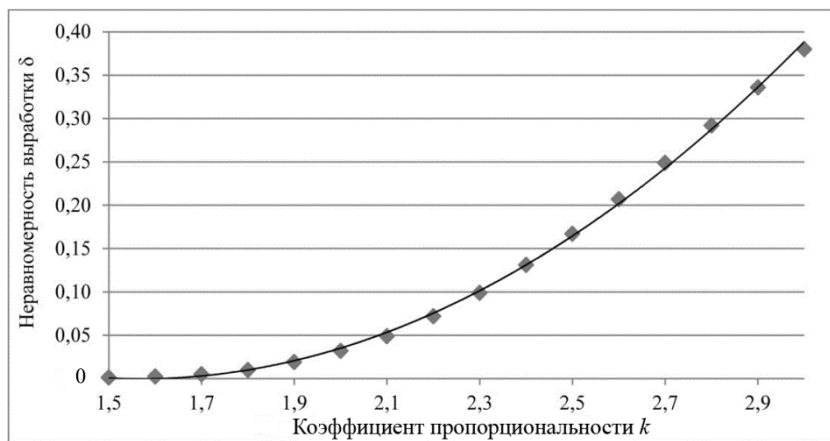


Рис. 6. Зависимость неравномерности выработки катода от относительного шага перемещения траектории катодного пятна k

Выводы. Проведенный анализ профиля выработки катода торцевого дугового испарителя с изменяемой траекторией движения катодного пятна показал следующее:

1) для обеспечения приемлемой неравномерности выработки необходимо уменьшать относительный шаг перемещения траектории катодного пятна. Неравномерность профиля выработки менее 3 % можно получить, если изменение радиуса движения катодного пятна составляет не более 1/3 от ширины дорожки выработки;

2) с увеличением индукции арочного магнитного поля ширина дорожки уменьшается, что приводит к необходимости уменьшать шаг перемещения траектории катодного пятна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ мол_а № 14-08-31354.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна. *Журнал технической физики*, 1959, т. 29, № 3, с. 287–298.
- [2] Sethuraman S.K., Barrault M.R. Study of the Motion of Vacuum Arcs in High Magnetic Field. *Journal of Nuclear Materials*, 1980, vol. 93–94, pp. 791–798.
- [3] Духопельников Д.В., Жуков А.В., Костин А.А. Управление движением катодного пятна в линейных вакуумно-дуговых испарителях. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2005, № 11, с. 45–49.
- [4] Береговский В.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Щуренкова С.А. Объемное содержание и дисперсный состав капельной фазы в покрытиях, полученных вакуумно-дуговым методом на установке PLATIT π-80. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2009, № 1, с. 3–5.
- [5] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле. *Инженерное образование*, 2012, № 01. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/256359.html> doi:77-30569/256359 (дата обращения 18.06.2013).
- [6] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем. *Инженерное образование*, 2012, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/482485.html> doi:10.7463/1112.0482485 (дата обращения 18.06.2013).

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html>

Духопельников Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, электрические ракетные двигатели, нанотехнологии. e-mail: duh@power.bmstu.ru

Кириллов Даниил Вячеславович — ассистент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, нанотехнологии, упрочняющие покрытия. e-mail: kirillovdy@bmstu.com

Рязанов Виктор Аркадьевич — инженер кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: rjzan@mail.ru

Чжо Вин Наинг — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, износостойкие покрытия. e-mail: kwn.bmstu@gmail.com