

Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем

11, ноябрь 2012

DOI: 10.7463/1112.0482485

Духопельников Д. В., Кириллов Д. В., Рязанов В. А.

УДК 67.05

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
rjzan@mail.ru***Введение***

Современная технология вакуумно-дугового нанесения покрытий требует снижения доли капельной фазы и размеров капель в продуктах эрозии катода и более полного использования материала катода. Для решения этих задач используют дуговые испарители с управляемым движением катодного пятна (катодной привязки). В таких испарителях используются магнитные системы, создающие на поверхности катода арочное магнитное поле [1]. В поперечном магнитном поле движение катодного пятна происходит в направлении противоположном силе Ампера, действующей в магнитном поле на столб дугового разряда [2, 3]. При этом траектория катодного пятна локализуется под аркой магнитного поля [4]. Траектория представляет собой ломаную линию с ответвлениями (рис. 1а). Ширина выработки определяется шириной зоны распространения ответвлений или видимой шириной дорожки оставляемой катодным пятном. При увеличении индукции магнитного поля длина ответвлений уменьшается, а угол между ветвями и основной траекторией становится более острым (рис. 1б). Видимая ширина дорожки катодного пятна сужается. При этом уменьшается зона выработки, превращаясь в узкую «канавку» [5]. Это приводит к существенной неравномерности выработки катода и снижению коэффициента использования материала. Устранить неравномерность

выработки возможно периодически смещая траекторию катодного пятна. Для расчета закона управления движением катодного пятна необходимо знать ширину и профиль выработки, оставляемый катодным пятном. В настоящей работе проведено исследование ширины и профиля выработки катода при движении катодного пятна в арочном магнитном поле в зависимости от величины индукции магнитного поля арочного поля и тока разряда.

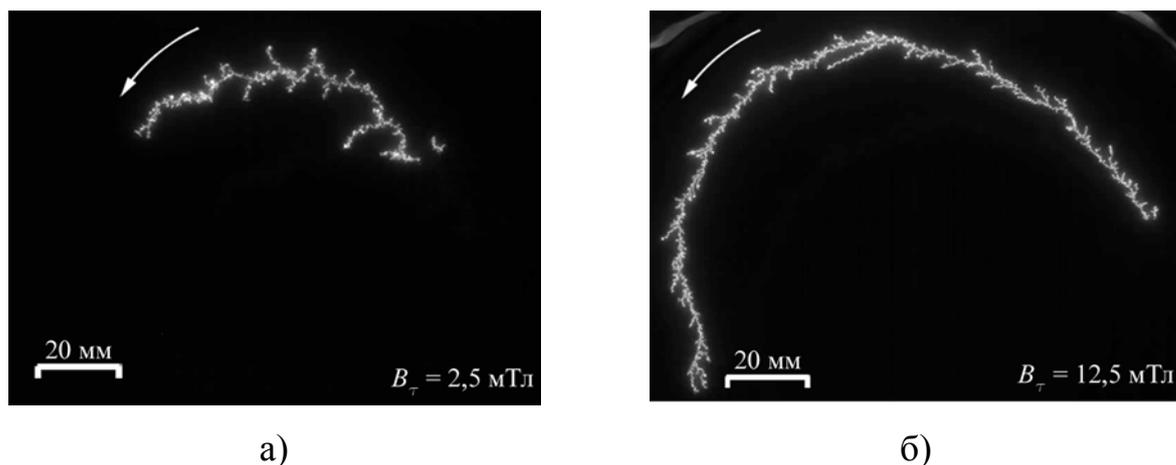


Рис. 1. Дорожка катодного пятна на поверхности катода.

Материал катода – титан, ток разряда 100 А.

а) индукция магнитного поля 2,5 мТл;

б) индукция магнитного поля 12,5 мТл.

1 Оборудование

Работа проводилась в вакуумной камере откачного поста УВН70-А2. Камера представляет собой цилиндр диаметром $D = 700$ мм и длиной $L = 700$ мм. На боковом фланце был закреплён дуговой испаритель с торцевым цилиндрическим охлаждаемым титановым катодом диаметром $D_k = 150$ мм (рис. 2а). Материал катода Ti 6-2-4-2 по стандарту ASTM. Химический состав катода: Ti 86,2 %, Al 6,4 %, Zr 2,7 %, Mo 1,9 %, V 1,9 %, Fe 0,8 % – был получен с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Bruker S1 Turbo, предоставленного ЗАО «Мелитек». Дуговой испаритель оснащен электромагнитной системой, которая создаёт на поверхности катода арочное магнитное поле и позволяет изменять величину и конфигурацию магнитного поля. Положение и скорость движения катодного пятна

определяется величиной и соотношением токов в катушках магнитной системы (см. рис. 2б). При этом изменяется радиус кругового движения катодного пятна. В качестве источника питания использовался сварочный выпрямитель ВД-306. Вакуумная дуга инициировалась на боковой поверхности катода испарителя путем инъекции плазмы в разрядный промежуток. Величина индукции магнитного поля определялась измерителем магнитной индукции Ш1-8 на расстоянии 3 мм от поверхности катода в точке 5 (рис. 2б) под аркой магнитного поля.

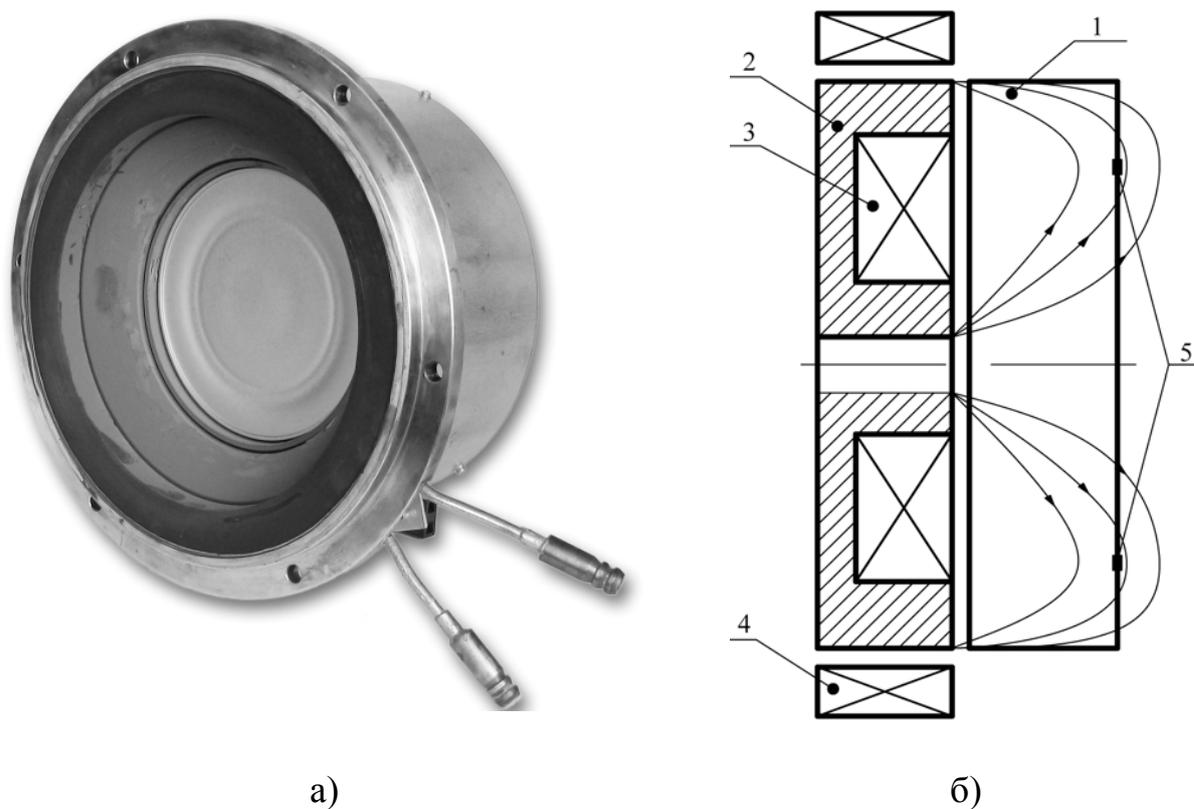
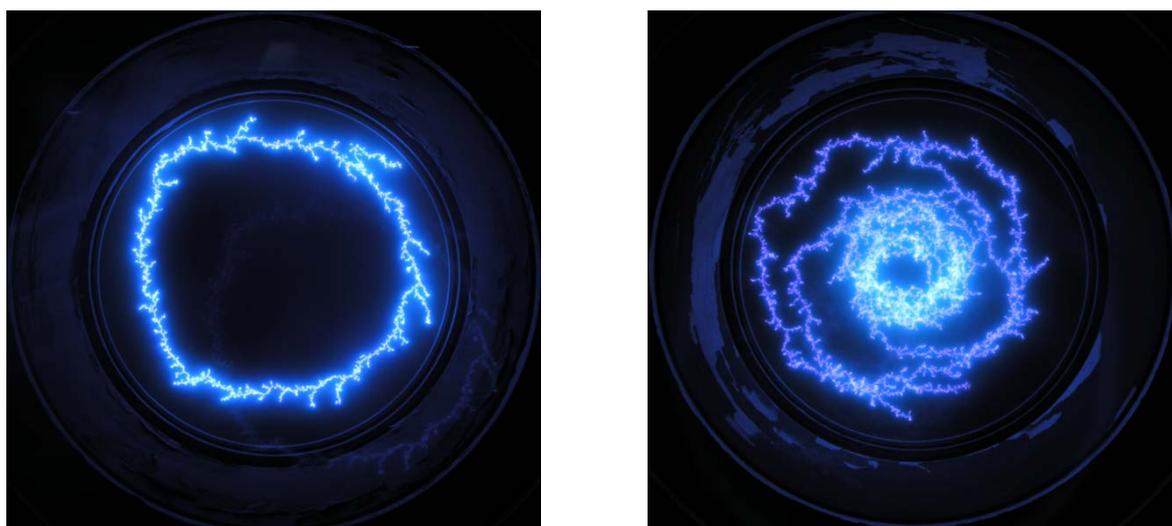


Рис. 2. Торцевой вакуумный дуговой испаритель с диаметром катода $D_k=150$ мм.

а) фотография испарителя после проведения исследований; б) схема дугового испарителя: 1 - катод, 2 – магнетрон, 3 – внутренняя электромагнитная катушка, 4 – внешняя электромагнитная катушка 5- положение катодной привязки.

Катодное пятно в выбранном режиме двигалось по окружности заданного диаметра. Движение катодных пятен регистрировалось скоростной видеокамерой VS-FAST-NG производства ЗАО «НПК Видеоскан». Видеокамера позволяет проводить непрерывную видеосъемку с частотой до 5000 кадров в секунду и минимальным временем экспозиции до 4 мкс. Тип сенсора - КМОП, 3 млн. пикселей. Камера устанавливалась в торце катода дугового испарителя на его оси так, чтобы можно было регистрировать движение катодного пятна без искажений. Съемка велась через кварцевое смотровое окно вакуумной камеры. На рис. 3 приведена типичная траектория движения катодных пятен при токе разряда $I_p=100$ А и величине индукции арочного магнитного поля $B=25$ мТл.



а)

б)

Рис. 3. Вид траектории движения катодных пятен при различных режимах управления магнитным полем. Ток разряда $I_p=100$ А, индукция магнитного поля $B=25$ мТл. Время экспозиции 10 мс.

а) траектория с фиксированным радиусом окружности; б) траектория с переменным радиусом окружности.

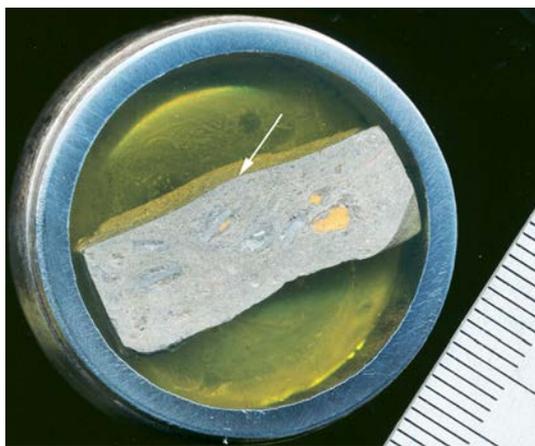
2 Эксперимент

Катод предварительно выравнивался торцеванием на токарном станке. Для формирования дорожки выработки дуговой испаритель работал 40 мин при фиксированном радиусе траектории движения катодного пятна.

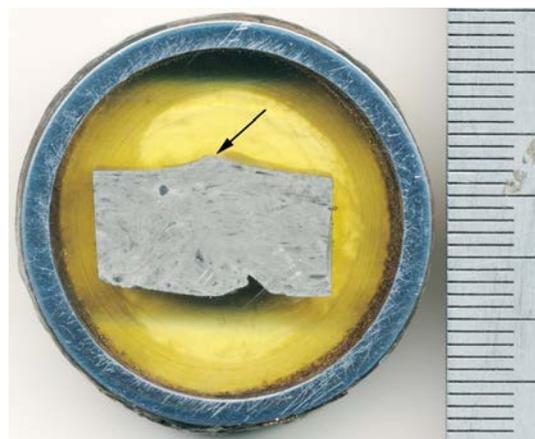
Для определения профиля выработки делался слепок с выработанного участка катода. После затвердевания формовочной массы изготавливался поперечный шлиф, соответствующий сечению профиля выработки. С помощью сканера получалось цифровое изображение шлифа с разрешением 1200 dpi (рис. 4), которое обрабатывалось в дальнейшем для получения профиля выработки.

Для оценки ширины дорожки выработки была проведена скоростная видеосъёмка движущегося катодного пятна с экспозицией для одного кадра 1 мс. Затем формировалось совмещенное изображение траектории движения катодного пятна последовательным наложением 100 случайно выбранных кадров (рис. 5). На полученных изображениях хорошо определяется ширина дорожки распыления.

Ширина дорожки выработки определялась при токе разряда от 80 А до 160 А с шагом 20 А, и величине индукции магнитного поля в центре арки от 1,3 мТл до 13,8 мТл с шагом 1,3 мТл. Для каждого из режимов проводилось десять измерений ширины дорожки в разных местах снимка для обеспечения статистической точности измерений. За значение ширины дорожки принималось расстояние между двумя крайними треками катодного пятна.



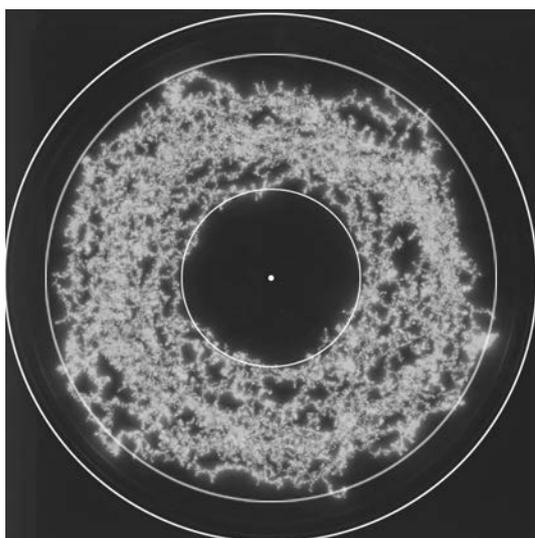
а)



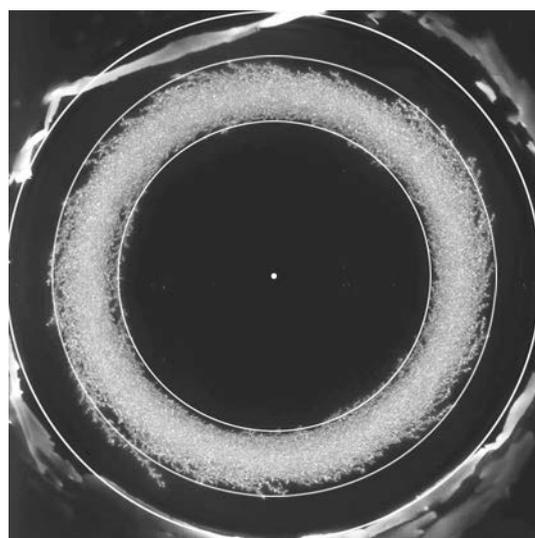
б)

Рис. 4. Шлиф профиля выработки катода дугового испарителя. Место выработки показано стрелкой.

а) ток разряда 100 А, индукция магнитного поля 6,3 мТл; б) ток разряда 100 А, индукция магнитного поля 12,5 мТл.



а)



б)

Рис. 5. Дорожка движения катодного пятна в различных режимах.

а) ток разряда 80 А, индукция магнитного поля 1,3 мТл; б) ток разряда 160 А, индукция магнитного поля 13,8 мТл.

3 Результаты

Измерения профиля слепков показали, что профиль выработки хорошо описывается Гауссовым распределением [7]. На рис. 6 приведены профили выработки при токе разряда 100 А и индукции магнитного поля 6,3 мТл (рис. 6а) и 12,5 мТл (рис. 6б). Точность аппроксимации R^2 составляет 0,9475 и 0,9176 для данных на рис. 6а и рис. 6б соответственно.

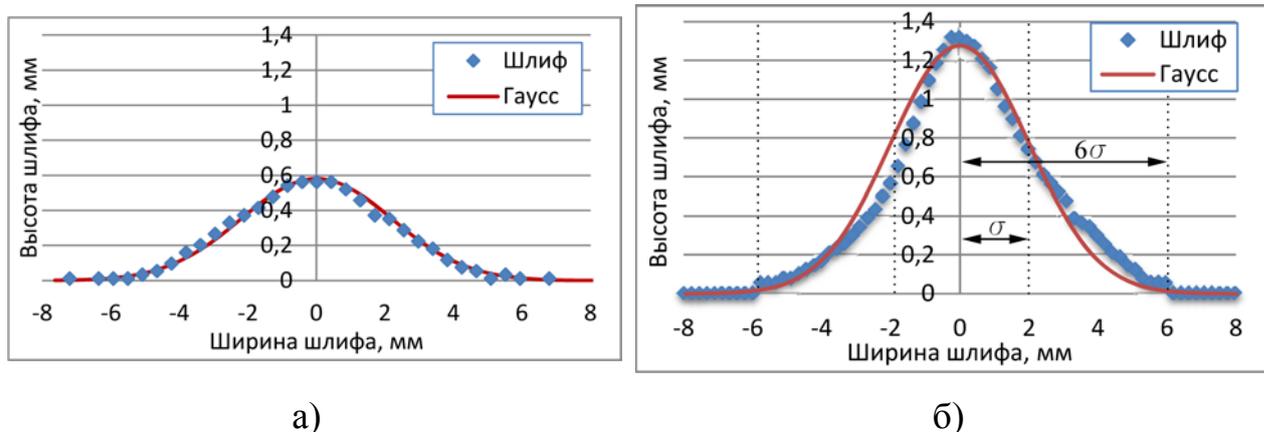
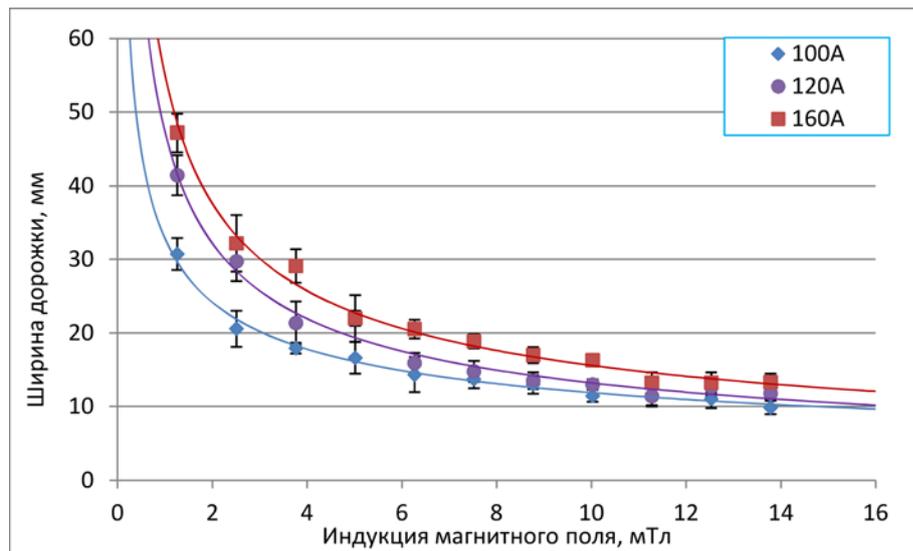


Рис. 6. Профиль выработки и описывающая её кривая Гауссова распределения.

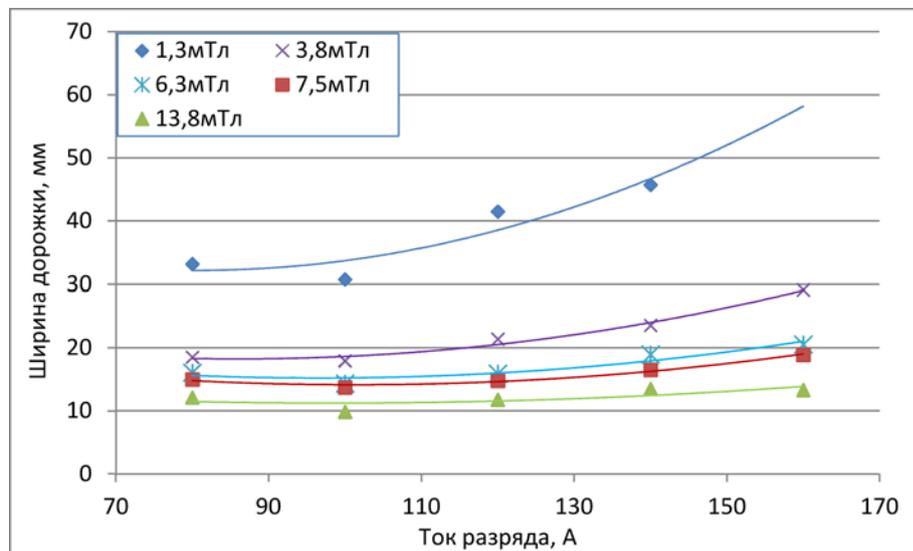
а) ток разряда 100 А, индукция магнитного поля 6,3 мТл; б) 100 А, 12,5 мТл.

Сравнение полученных при помощи слепков профилей выработки и ширины дорожки выработки, полученных скоростной видеосъемкой показали, что ширина профиля выработки может с высокой точностью оцениваться видеосъемкой.

Зависимости ширины дорожки выработки от величины тока разряда и индукции магнитного поля для различных режимов работы приведены на рис. 7. Из рисунка 7 видно, что при увеличении индукции магнитного поля ширина дорожки выработки снижается и стремится к величине 10-12 мм при полях более 14,0 мТл.



а)



б)

Рис. 7. Зависимости ширины дорожки выработки от величины индукции магнитного поля (а) и тока разряда (б).

4 Обсуждение

Полученные данные позволяют утверждать, что ширина зоны выработки зависит от тока разряда и от величины индукции магнитного поля, а профиль выработки не изменяется, оставаясь гауссовым. С увеличением тока разряда зона выработки увеличивается по экспоненциальному закону (1):

$$\delta = \delta_0 + a \cdot \exp(R_0 \cdot I_p), \quad (1)$$

где δ_0 , a , R_0 – положительные коэффициенты, I_p – ток разряда.

При увеличении магнитного поля при любом значении тока разряда ширина зоны выработки уменьшается по степенному закону (2):

$$\delta = a \cdot B^{-b}, \quad (2)$$

где a , b – положительные коэффициенты, B – величина индукции магнитного поля.

Можно говорить о том, что существует минимальное значение ширины профиля выработки равное $10 \pm 1,5$ мм. При увеличении индукции магнитного поля более 14,0 мТл ширина профиля выработки практически не уменьшается. Это следует учитывать, т.к. одним из перспективных направлений дальнейшего развития вакуумно-дуговых устройств является существенное увеличение магнитного поля (до $3 \cdot 10^{-2}$ - $6 \cdot 10^{-2}$ Тл).

Полученные зависимости ширины зоны выработки от параметров работы дугового испарителя позволяют создавать системы управления движением катодного пятна, обеспечивающие более полное использование материала катода.

Заключение

В результате проведённых исследований профиля выработки, оставляемого катодным пятном, можно заключить следующее:

1. Профиль выработки хорошо описывается Гауссовым распределением.
2. Ширина зоны выработки может с высокой точностью оцениваться видеосъемкой.
3. При увеличении индукции магнитного поля ширина зоны выработки движущегося катодного пятна уменьшается и стремится к величине 10-12 мм при полях более 14,0 мТл.
4. Ширина зоны выработки при увеличении индукции магнитного поля уменьшается по степенному закону.

5. Ширина зоны выработки при увеличении тока разряда увеличивается по экспоненциальному закону.

Список литературы

1. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // Журнал технической физики. 1959. Т. 29, № 3. С. 287-298.
2. 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.
3. Juttner B. The dynamic of arc cathode spots in vacuum. Part III: measurements with improved resolution and UV radiation // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol. 31, no. 14. P. 1728-1736. [doi:10.1088/0022-3727/31/14/017](https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/14/017)
4. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
5. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 1. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/256359.html> (дата обращения 03.11.2012).
6. Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К. Структура и особенности движения катодного пятна вакуумной дуги на протяжённом титановом катоде // Измерительная техника. 2003. № 10. С. 42-44.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

Research of generation profile of cathode of arc evaporator with arched magnetic field

11, November 2012

DOI: 10.7463/1112.0482485

Duhopel'nikov V.V., Kirillov D.V., Ryazanov V.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
rjzan@mail.ru

Generation profile of the cathode of the arc evaporator was researched in various operating modes: at the change of the discharge current and induction of the arched magnetic field. Width of the generation profile was compared with the width of cathode-spot motion. Dependences of the width of the cathode-spot motion on the discharge current and induction of the arched magnetic field were obtained.

Publications with keywords: [vacuum arc](#), [cathode spot](#), [evaporator](#), [worked out](#), [resource](#)
Publications with words: [vacuum arc](#), [cathode spot](#), [evaporator](#), [worked out](#), [resource](#)

References

1. Kesaev I.G., Pashkova V.V. Elektromagnitnaia fiksatsiia katodnogo piatna [Electromagnetic fixation of the cathode spot]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 1959, vol. 29, no. 3, pp. 287-298.
2. Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M., Grigor'ev S.N. *Vakuumno-dugovye ustroistva i pokrytiia* [Vacuum-arc devices and coatings]. Khar'kov, National scientific center «Kharkov physical-technical Institute» Publ., 2005. 236 p.
3. Juttner B. The dynamic of arc cathode spots in vacuum. Part III: measurements with improved resolution and UV radiation. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1998, vol. 31, no. 14, pp. 1728-1736. [doi:10.1088/0022-3727/31/14/017](https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/14/017)
4. Saksaganskii G.L. *Elektrofizicheskie vakuumnye nasosy* [Electrophysical vacuum pumps]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 280 p.
5. Duhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Shchurenkova S.A. Dinamika dvizheniia katodnykh piaten po poverkhnosti katoda v poperechnom magnitnom pole [The dynamic of cathode spots movement along the cathode surface in transverse magnetic field]. *Nauka i obrazovanie MGTU*

im. N.E. Baumana [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/256359.html> , accessed 03.11.2012.

6. Dukhopel'nikov D.V., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Struktura i osobennosti dvizheniia katodnogo piatna vakuumnoi dugi na protiazhennom titanovom katode [Structure and features of motion of a cathode spot of vacuum arc on the long titanium cathode]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement technique], 2003, no. 10, pp. 42-44.
7. Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability theory]. Moscow, Nauka, 1969. 576 p.