

Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии

04, апрель 2014

DOI:10.7463/0414.0707391

Духопельников Д. В., Кириллов Д. В., Воробьев Е. В., Ивахненко С. Г.

УДК 66.088

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

duh@power.bmstu.ru

kirillovdy@gmail.com

evgsparrow@gmail.com

reeorion@yandex.ru

Введение

Вакуумный дуговой разряд используется для нанесения износостойких, упрочняющих, жаропрочных и других функциональных покрытий. Основными преимуществами метода являются высокая скорость нанесения покрытия, возможность гибкого управления потоками плазмы, низкая энергоёмкость метода [1]. В торцевых дуговых испарителях на расстояниях больше диаметра катода испаряемый материал распределяется в пространстве по косинусоидальному закону Ламберта-Кнудсена [2,3]. При низком давлении и на больших расстояниях от катода торцевой дуговой испаритель можно считать плоским точечным источником.

Часто возникает необходимость нанесения покрытия толщиной 30 мкм и более. В работе [4] описано использование подобных покрытий для повышения служебных характеристик лопаток компрессора газотурбинного двигателя. При этом важно обеспечить заданную равномерность толщины покрытия по длине обрабатываемой детали. Считая торцевой испаритель плоским точечным источником, можно достаточно просто оценить необходимые расстояния между катодами и расстояние до детали, при которых обеспечивается необходимая равномерность толщины покрытия. Однако, нанесение толстых покрытий требует длительного времени, при котором на равномерность толщины покрытия может сказываться изменение распределения потока испаренного вещества вследствие изменения геометрии и появления существенной выработки на поверхности катода.

В работе [5] было проведено исследование равномерности толщины осаждаемого покрытия на протяжённой подложке при различных расстояниях от катода дугового испарителя с титановым катодом. Показано, что равномерность покрытия и скорость осаждения существенно зависят от расстояния от поверхности катода. При этом в публикациях нет данных о том, как влияет на равномерность толщины покрытия изменение геометрии катода вследствие его эрозии в течение длительного времени. При этом известно, что выработка катода может быть существенной, со значительным искажением геометрии катода [6].

Целью данной работы является проведение исследования влияния процесса выработки алюминиевого катода торцевого вакуумного дугового испарителя на угловое распределение испаренного вещества при длительной работе.

1. Оборудование

Эксперимент проводился в вакуумной камере диаметром 700 мм и длиной 500 мм. На боковом фланце был закреплён дуговой испаритель с торцевым цилиндрическим охлаждаемым катодом из алюминиевого сплава Д16 с диаметром 100 мм. Дуговой испаритель оснащен электромагнитной системой, которая увеличивает зону эрозии катода. Непрерывная работа дугового испарителя при токе разряда 100 ± 1 А обеспечивалась источником питания на основе сварочного выпрямителя EWM TETRIX 230 AC/DC с системой управления разрядом.

Толщина покрытия измерялась методом ступеньки с помощью контактного профилометра завода «Калибр» модель 170622 с механотронным преобразователем. Погрешность измерения профиля ± 10 нм, протяжённость измеряемого профиля 10 мм.

2. Эксперимент и результаты

Задачей эксперимента было измерение распределения толщины покрытия на подложке расположенной перпендикулярно оси дугового испарителя при различной выработке катода.

Покрытие осаждалось на протяжённую подложку, выполненную из флоат-стекла М1 длиной 650 мм, стоящую перпендикулярно оси испарителя на расстоянии 140 мм от поверхности его катода (рис. 1). Толщина покрытия измерялась методом ступеньки [7], которая формировалась на подложке с помощью маски. В качестве маски использовались специально выполненные стальные пластинки, закреплённые на поверхности стекла. Толщина покрытия измерялась на всём протяжении подложки с шагом 50 мм. В каждой точке проводилось не менее 5 измерений.

Для оценки влияния выработки катода на распределение толщины покрытия эксперимент проводился при различных временах работы катода: 0 часов, 6 часов, 12 часов. Время нанесения покрытия составляло 4 минуты. Перед нанесением покрытия из невыработанного катода производилась его предварительная проработка в течение 5 минут. За это

время работы стабилизировались параметры разряда, и прорабатывалась поверхность катода, которая из гладкой становилась шероховатой, полностью покрытой кратерами.

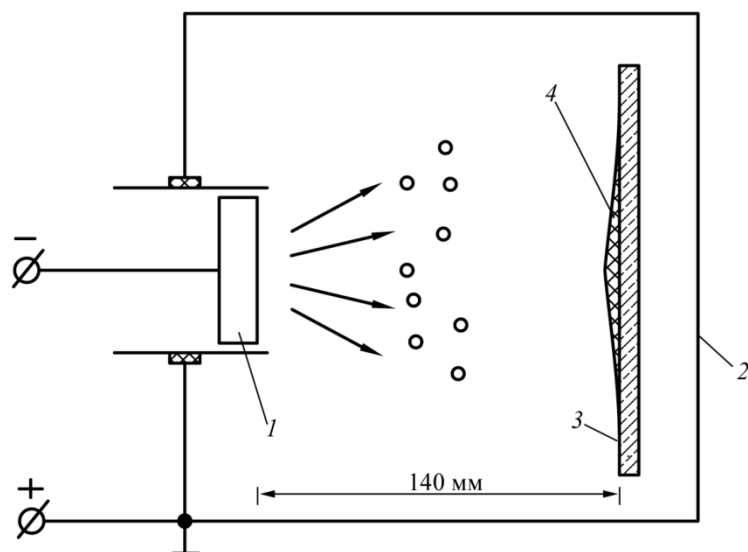


Рис. 1. Схема расположения подложки в вакуумной камере для измерения равномерности потока плазмы:
1 – катод; 2 – анод-камера; 3 - протяжённая подложка из стекла М1; 4 – покрытие

В процессе длительной работы профиль катода значительно изменялся: в течение первых 6 часов глубина выработки составила около 15 мм, после 12 часов глубина выработки составила около 20 мм. Изменение профиля выработки катода с течением времени приведены на рис. 2.

Распределения по толщине покрытия на подложках, соответствующие 0, 6 и 12 часам работы катода приведены на рис. 2. Как и ожидалось, изменение профиля катода (заглубление рабочей зоны) сказывается в сторону ухудшения равномерности покрытия. Так на расстоянии от центра 5 см толщина покрытия после 6 часов работы катода уменьшается на 7 %, после 12 часов – на 12 %.

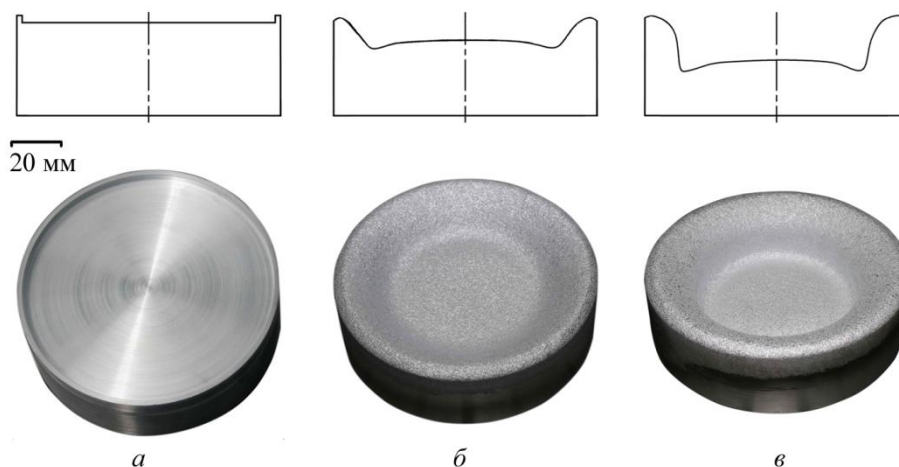


Рис. 2. Изменение профиля выработки катода и фото катода соответствующие профилям выработки при различных временах работы:

a – новый катод; *б* – после 6 часов работы; *в* – после 12 часов работы

Распределения толщины покрытия, соответствующие 0, 6 и 12 часам работы катода приведены на рис. 3. Как и ожидалось, углубление катода приводит к ухудшению равномерности покрытия. Так, на расстоянии от центра 50 мм толщина покрытия после 6 часов работы катода уменьшается на 7 %, после 12 часов – на 12 %.

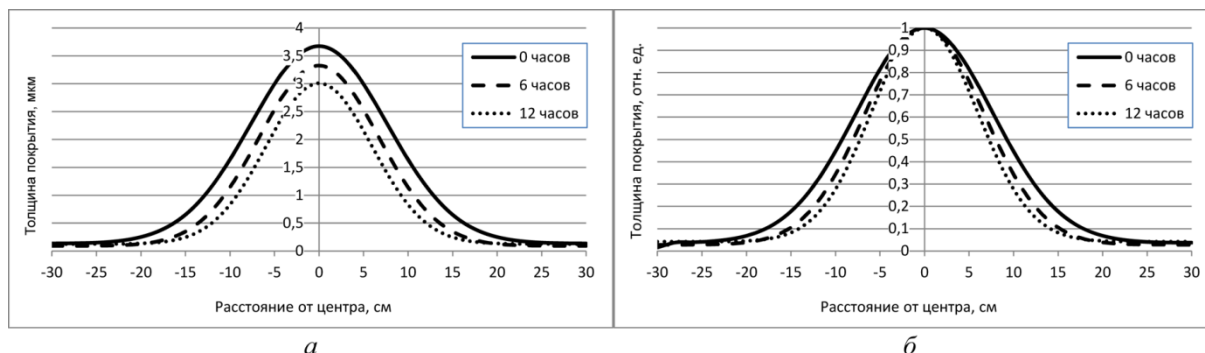


Рис. 3. Распределение толщины покрытия на плоской подложке при различном времени работы катода: *a* – абсолютные значения; *б* – безразмерные нормированные значения толщины покрытия

По полученным профилям толщины покрытия восстанавливались угловые распределения испаренного вещества.

Угловое распределение массы испаренного вещества определяется как распределение массы $dM(\varphi)/d\omega$, перенесенной из катода в телесный угол $d\omega$ в направлении угла φ между нормалью к испарителю и направлением потока. Рассмотрим плоскую подложку, расположенную на расстоянии R_0 от катода испарителя (рис.4). Координате x на подложке соответствует угол φ . Расстояние от поверхности катода до площадки подложки с координатой x равно $R(\varphi)$. На расстоянии x от оси испарителя толщина покрытия $\delta(\varphi)$ может быть определена как

$$\delta(\varphi) = \frac{1}{\rho} \frac{dM(\varphi)}{ds} \cos(\varphi) = \frac{1}{\rho} R(\varphi)^2 \frac{dM(\varphi)}{d\omega} \cos(\varphi) \quad (1)$$

где ds – элементарная площадка покрытия; ρ – плотность материала покрытия.

Расстояние от испарителя до точки подложки с координатой x , которой соответствует угол φ , равно

$$R(\varphi) = R_0 \cos(\varphi) \quad (2)$$

Из (1) с учетом (2) получаем

$$\delta(\varphi) = \frac{1}{\rho} R_0^2 \cos^3(\varphi) \frac{dM(\varphi)}{d\omega} \quad (3)$$

Тогда угловое распределение массы испаренного материала в безразмерном виде может быть определено как

$$\frac{dm(\varphi)}{d\omega} = \frac{dM(\varphi)/d\omega}{dM(0)/d\omega} = \frac{\delta(\varphi)}{\delta_0} \frac{1}{\cos^3(\varphi)} \quad (4)$$

Угловое распределение потока испаренного из плоского точечного источника вещества подчиняется косинусоидальному закону Ламберта–Кнудсена [3]

$$dM(\varphi) = \frac{M_0 \cos(\varphi)}{\pi} d\omega,$$

где $dM(\varphi)$ – масса вещества, испаряемая в телесный угол $d\omega$ в направлении угла φ ; M_0 - общая масса испаренного вещества; $d\omega$ - телесный угол, в который испаряется поток $dM(\varphi)$.

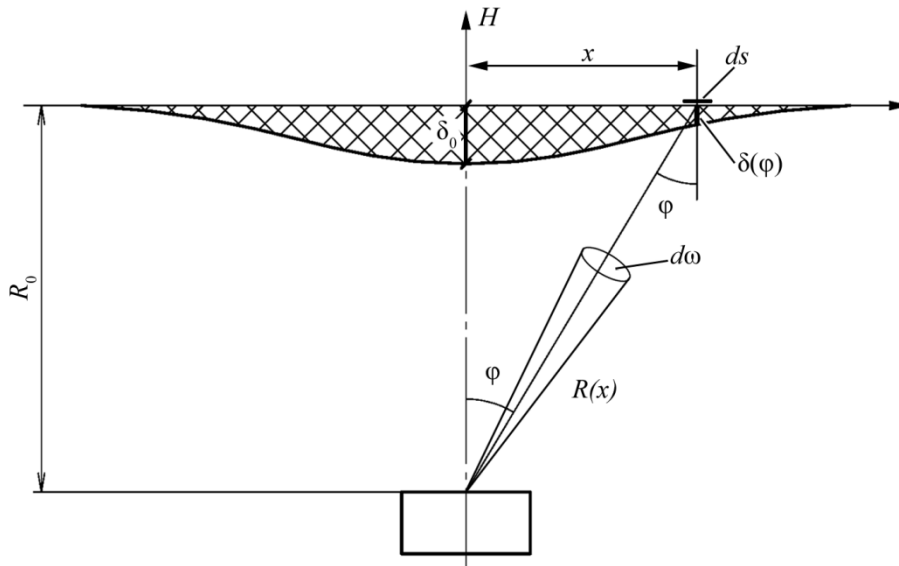


Рис. 4. Схема распределения испаренного материала по подложке

Угловое распределение Ламберта-Кнудсена, построенное в полярных координатах, представляет собой окружность с диаметром равным M_0/π . В безразмерной нормализованной форме закон Ламберта-Кнудсена может быть записан как

$$\frac{dm(\varphi)}{d\omega} = \frac{dM(\varphi)}{dM_0} = \cos(\varphi) \quad (5)$$

Полученные угловые распределения показаны в полярных координатах (рис. 5). Для наглядности распределение вещества от плоского точечного источника показано сплошной толстой линией.

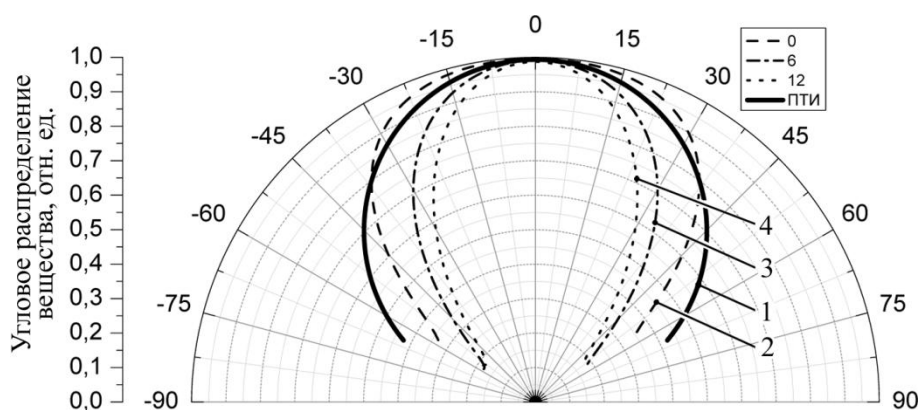


Рис. 5. Угловое распределение массы испаряемого вещества для различного времени работы катода дугового испарителя:

1 – плоский точечный источник; 2 – новый катод; 3 – катод после 6 часов работы; 4 – катод после 12 часов работы.

3. Обсуждение

Распределение потоков вещества во всех случаях отличается от потока из плоского точечного источника. При малых углах φ угловая плотность потока превышает кривую Ламберта-Кнудсена. При больших углах φ угловая плотность потока меньше, чем ожидаемая.

Отклонение от косинусоидального закона при малых углах φ можно объяснить тем, что размеры катода соизмеримы с расстоянием от испарителя до подложки. При этом испаритель нельзя считать точечным источником. На больших углах φ на поток влияет изначальная геометрия катода (буртик). После работы катода 6 и 12 часов на распределение вещества существенное влияние оказывает увеличивающаяся высота буртика. В результате поток становится зауженным, вытянутым вдоль оси испарителя, что приводит к росту неравномерности покрытия. При этом происходит снижение скорости роста покрытия (рис. 3), т.к. часть испаренного материала перехватывается растущим буртиком.

Выводы

1) При длительной работе вакуумно-дугового испарителя с торцевым катодом и электростатической фиксацией катодного пятна происходит сужение диаграммы углового распределения испаренного материала, что приводит к увеличению неравномерности толщины покрытия. При этом снижается скорость роста покрытия. Это объясняется перехватом части распыленного материала, растущим по мере выработки катода, буртиком.

2) Для обеспечения стабильного распределения потоков материала необходимо выбирать толщину и диаметр катода, а также распределение магнитного поля, формирующего профиль выработки при которых происходит наименьшее изменение углового распределения потоков материала.

Список литературы

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.М. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.
2. Технология тонких пленок: справочник. Т. 1. Изготовление тонких пленок : пер. с англ. / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М.: Советское радио, 1977. 664 с.
3. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Мелик-Парсаданян А.К., Пархоменко Ю.Н. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9. С. 22-27.
4. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2013. № 1. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2 (дата обращения 01.03.2014).
5. Straumal V., Gust W., Vershinin N., Dimitriou R., Rabkin E. Nanostructured vacuum arc deposited titanium coatings // Mater. Phys. Mech. 2002. No. 5. P. 39-42.
6. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Влияние выработки катода дугового испарителя на угловое распределение продуктов эрозии // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 15-17 апреля 2014 г.) / под ред. С.Б. Нестерова. М.: НОВЕЛЛА, 2014.
7. Костржицкий А.И., Карпов В.Ф., Кабанченко М.П., Соловьева О.Н. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.

The influence of cathode excavation of cathodic arc evaporator on thickness uniformity and erosion products angle distribution

04, April 2014

DOI: [10.7463/0414.0707391](https://doi.org/10.7463/0414.0707391)

D.V. Duhopel'nikov, D.V. Kirillov, E.V. Vorob'ev, S.G. Ivakhnenko

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

duh@power.bmstu.ru

kirillovdv@gmail.com

evgsparrow@gmail.com

reeorion@yandex.ru

Cathodic arc evaporators are used for coating with functional films. Prolonged or butt-end evaporators may be used for this purposes. In butt-end evaporator the cathode spots move continuously on the cathode work surface and evaporate cathode material. High depth excavation profile forms on the cathode work surface while the thick coating precipitation (tens or hundreds of microns). The cathode excavation profile is shaped like a “cup” with high walls for electrostatic discharge stabilization systems with axial magnetic fields. Cathode spots move on the bottom of the “cup”. It is very likely that high “cup” walls are formed as a result of lasting work time influence on the uniformity of precipitated films.

In the present work the influence of excavation profile walls height on the uniformity of precipitated coating was carried out. The high profile walls are formed due to lasting work of DC vacuum arc evaporator. The cathode material used for tests was **3003 aluminum alloy**. The extended substrate was placed parallel to the cathode work surface. Thickness distribution along the substrate length with the new cathode was obtained after 6 hours and after 12 hours of continuous operation.

The thickness distribution of precipitated coating showed that the cathode excavation has an influence on the angular distribution of the matter escaping the cathode. It can be clearly seen from the normalized dependence coating thickness vs the distance from the substrate center. Also the angular distribution of the matter flow from the cathode depending on the cathode working time was obtained. It was shown that matter flow from the cathode differs from the Lambert-Knudsen law. The more the cathode excavation the more this difference.

So, cathode excavation profile has an influence on the uniformity of precipitated coating and it is necessary to take in account the cathode excavation profile while coating the thick films.

Publications with keywords: [vacuum arc](#), [cathode spot](#), [erosion](#), [arc evaporator](#)

Publications with words: [vacuum arc](#), [cathode spot](#), [erosion](#), [arc evaporator](#)

References

1. Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M., Grigor'ev S.M. *Vakuumno-dugovye ustroystva i pokrytiya* [Vacuum-arc devices and coatings]. Khar'kov, NSC KIPT Publ., 2005. 236 p. (in Russian).
2. Maissel L.I., Glang R., eds. *Handbook of Thin Film Technology*. New York, McGraw-Hill, 1970. (Russ. ed.: Maissel L.I., Glang R., eds. *Tekhnologiya tonkikh plenok: spravochnik. T. 1. Izgotovlenie tonkikh plenok*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 664 p.).
3. Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Melik-Parsadanyan A.K., Parkhomenko Yu.N. [Vacuum arc on the single-crystal silicon cathode for nanomaterials production]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal - Handbook. An Engineering journal*, 2008, no. 9, pp. 22-27. (in Russian).
4. Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. [The research opportunity to improve service properties of compressor GTE blades ion modified surface method]. *Trudy VIAM - Proceedings of VIAM*, 2013, no. 1. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2, accessed 01.03.2014. (in Russian).
5. Straumal B., Gust W., Vershinin N., Dimitriou R., Rabkin E. Nanostructured vacuum arc deposited titanium coatings. *Mater. Phys. Mech.*, 2002, no. 5, pp. 39-42.
6. Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G. [Effect of cathode generation of arc evaporator on angular distribution of the products of erosion]. *Materialy 9 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya"* [Proc. of the 9th International scientific and technical conference "Vacuum equipment, materials and technology"], Moscow, 15-17 April, 2014. Moscow, NOVELLA Publ., 2014. (in Russian).
7. Kostrzhitskiy A.I., Karpov V.F., Kabanchenko M.P., Solov'eva O.N. *Spravochnik operatora ustanovok po naneseniyu pokrytiy v vakuume* [Handbook of operators of installations for coating in vacuum]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 176 p. (in Russian).