

УДК 621.793.18

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КАТОДА ВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ИСПАРИТЕЛЯ ПЛАЗМЫ НА ВЕЛИЧИНУ ДОПУСТИМОГО ТОКА ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Докт. техн. наук, проф. ИВАНОВ И. А., магистрант НАРУШКО Е. О.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: iivanou@bntu.by

Проведен анализ основных конструктивных параметров, определяющих степень интенсивности формирования капель на стадии генерации плазменного потока. Рассмотрены наиболее широко используемые конструкции водоохлаждаемых расходоуемых катодов. В качестве материала катодов брали Ti или сплавы Ti–Si, Fe–Cr. Для определения зависимости величины предельно допустимого тока дугового разряда от высоты катода были приняты следующие расчетные данные: средний заряд иона Z_i для титановой плазмы +1,6, для плазмы «титан – кремний» +1,2; заряд электрона $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл; скорость движения иона $v_i = 2 \cdot 10^4$ м/с; эффективный вольтовый эквивалент энергии теплового потока, отводимого в катод, $U_k = 12$ В; температура эродирующей поверхности катода $T_{п} = 550$ К; температура охлаждаемой поверхности катода $T_0 = 350$ К. Расчет проводили для разных значений высот катода h_k (от 0,02 до 0,05 м). Диаметр катода-мишени для большинства технологических плазменных устройств равен 0,08 м, следовательно, площадь эродирующей поверхности $S = 0,005$ м².

Теоретически обоснован выбор толщины расходоуемой части катода-мишени вакуумного электродугового источника плазмы, при которой в процессе дугового испарения материала катода обеспечивается образование минимального количества капельной фазы в плазменном потоке. Показано, что при толщине расходоуемой части катода h_k , равной 0,05 м, величина предельно допустимого тока дугового разряда практически равна значению минимального тока устойчивого горения дуги. При малых h_k ток допустимого разряда может быть значительным и обеспечивать высокую производительность процесса нанесения покрытий при образовании относительно низкого количества капельной фазы в покрытии.

Ключевые слова: ток дугового разряда, катод, капельная фаза.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

INFLUENCE OF VACUUM ARC PLASMA EVAPORATOR CATHODE GEOMETRY OF ON VALUE OF ADMISSIBLE ARC DISCHARGE CURRENT

IVANOU I. A., NARUSHKO H. O.

Belarusian National Technical University

An analysis of main design parameters that determine a level of droplet formation intensity at the generating stage of plasma flow has been given in the paper. The paper considers the most widely used designs of water cooled consumable cathodes. Ti or Ti–Si and Fe–Cr alloys have been taken as a material for cathodes. The following calculated data: average ionic charge Z_i for titanium plasma +1.6; for «titanium–silicon plasma» +1.2, an electronic discharge $1.6022 \cdot 10^{-19}$ C, an ion velocity $v_i = 2 \cdot 10^4$ m/s, an effective volt energy equivalent of heat flow diverted in the cathode $U_k = 12$ V, temperature of erosion cathode surface $T_{п} = 550$ K; temperature of the cooled cathode surface $T_0 = 350$ K have been accepted in order to determine dependence of a maximum admissible arc discharge current on cathode height. The calculations have been carried out for various values of the cathode heights h_k (from 0.02 to 0.05 m). Diameter of a target cathode is equal to 0.08 m for a majority of technological plasma devices, therefore, the area of the erosion surface is $S = 0.005$ m².

A thickness selection for a consumable target cathode part in the vacuum arc plasma source has been justified in the paper. The thickness ensures formation of minimum drop phase in the plasma flow during arc cathode material evaporation. It has been shown that a maximum admissible current of an arc discharge is practically equal to the minimum current of stable arcing when thickness of the consumable cathode part is equal to 0.05 m. The admissible discharge current can be rather significant and ensure high productivity during coating process with formation of relatively low amount of droplet phase in the coating at small values of h_k .

Keywords: arc discharge current, cathode, droplet phase.

Fig. 2. Tab. 3. Ref.: 10 titles.

Разработка эффективных вакуумных электродуговых источников низкотемпературных

плазменных потоков остается по-прежнему актуальной задачей [1]. Это связано с такими до-

стоинствами данных источников, как высокая степень ионизации плазменного потока, существование плазмы на значительном расстоянии от поверхности катода-мишени, возможность получения многокомпонентных покрытий на основе тугоплавких соединений без значительного нагрева основы [2]. Формирование плазменных потоков в электродуговых испарительных устройствах происходит в результате эрозионного испарения материала катода в катодных пятнах вакуумной дуги. Из-за малых размеров катодных пятен (10^{-3} м) плотность тока дугового разряда достигает значительных величин (10^9 А/м²). Это приводит к взрывному испарению материала катода с формированием не только плотной ($n = 10^{18}$ м⁻³) высокоионизированной плазмы, но и капель, что является причиной образования дефектов в осаждаемых покрытиях [3].

Количество капельной фазы зависит от температуры поверхности катода, которая в свою очередь определяется как величиной тока дугового разряда (чем она выше, тем больше теплоты выделяется на поверхности эрозии), так и эффективностью отвода теплоты от эродирующей поверхности. Эффективность теплоотвода существенно зависит от конструктивного исполнения катодного узла: в первую очередь от размеров катода (его длины и диаметра) и принятой схемы охлаждения. В [4] на примере катодов из титана марки ВТ1 показано, что увеличение длины цилиндрического катода от 15 до 50 мм сопровождается повышением температуры его поверхности от 330 до 800 °С. При этом скорость эрозии возрастает в два раза (от $3,9 \cdot 10^{-8}$ до $7,6 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл соответственно). Дополнительные измерения позволили установить, что рост скорости эрозии в данном случае связан с увеличением доли капельной фазы в плазменном потоке. Это отрицательно сказывается на качестве формируемых покрытий [5].

Цель исследований авторов – установить зависимость между величиной предельно допустимого тока дугового разряда и размерами (толщиной) расходоуемой части катода вакуумного электродугового испарителя. Для расчета выбрана конструкция водоохлаждаемого расходоуемого катода, представленного на рис. 1. Катод может быть выполнен целиком из метал-

лического сплава или состоять из двух частей – крепежной и расходоуемой. В последнем случае в качестве материала расходоуемой части можно брать сплавы металлов с неметаллами, например титан – кремний [6]. Использование стабилизирующих электромагнитных катушек позволяет локализовать дуговой разряд на торцевой поверхности катода, что уменьшает вероятность появления пробоев. Благодаря постоянному охлаждению катод остается интегрально холодным.

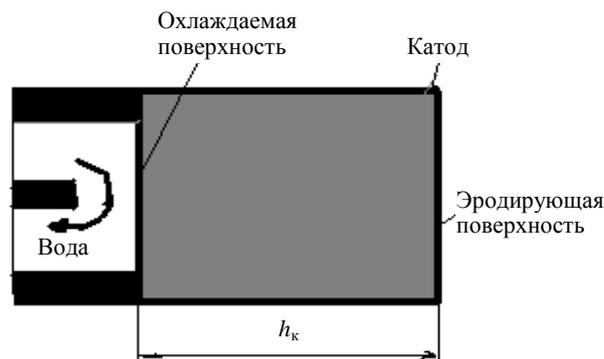


Рис. 1. Конструкция и схема охлаждения катодного узла, принятые в расчетах

Массовая скорость эрозии катода dm , кг/с, зависит от тока дугового разряда $I_{\text{дуги}}$, А:

$$d_m = \eta I_{\text{дуги}}, \quad (1)$$

где η – коэффициент электропереноса, кг/Кл.

Для большинства материалов величина коэффициента электропереноса η составляет порядка нескольких десятков микрограммов на кулон. Величины коэффициентов электропереноса для разных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина коэффициента электропереноса некоторых материалов, используемых в технологических целях [1, 4]

Материал катода	Значение η , (кг/Кл)·10 ⁻⁸
Титан ВТ1	3,9
Алюминий АВ0	12,0
Цирконий	5,1
Молибден	5,2
Ti-Si (80 ат. %)	6,3
Zr-Si (84 ат. %)	8,5
Mo-Si (76 ат. %)	6,0
Hf-Si (88 ат. %)	10,0

Зная величину коэффициента электропереноса материала катода и рабочий ток дугового разряда, можно определить геометрические размеры расходуемой части катода, необходимые для обеспечения требуемого времени работы электродугового источника плазмы. Например, скорость эрозии сплава «титан – 80 ат. % кремния» при токе дугового разряда 75 А равна $4,73 \cdot 10^{-6}$ кг/с. При массе рабочей части катода 0,3 кг его полное срабатывание в процессе непрерывного режима работы составит 17,6 ч. При восьмичасовой рабочей смене с учетом технического времени на разогрев (1 ч) и остывание (0,9 ч) диффузионного насоса вакуумной установки и средней длительности технологического цикла (1 ч) оператор может обработать одним катодом 18 полных загрузок в течение трех рабочих смен. Для катода из титана марки ВТ1 такой же массы при токе дугового разряда 100 А время непрерывной работы – 21,4 ч. При той же длительности технологического цикла время работы одним катодом составит уже четыре рабочие смены. Однако на практике геометрические размеры катода, в первую очередь его высоту, необходимо ограничивать.

Основная характеристика, влияющая на скорость эрозионного испарения катода, – это температура его эродирующей поверхности, которая зависит от величины разрядного тока, переносимого через единицу площади эродирующей поверхности катода (F_k)

$$j_k = \frac{I_{\text{дуги}}}{F_k}. \quad (2)$$

Размеры катода зависят от максимально возможной концентрации ионов n_{ik} и, следовательно, плотности тока j_k на катоде, а также принятой схемы охлаждения катодного узла [7]

$$j_k = \frac{a}{h_k} \frac{T_{\text{п}} - T_0}{U_k}, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала катода; h_k – длина катода (рис. 1); $T_{\text{п}}$ – температура эродирующей поверхности; T_0 – то же охлаждаемой поверхности; U_k – эффективный вольтовый эквивалент энергии теплового потока, отводимого в катод.

Эффективный вольтовый эквивалент энергии, как показано в [8], определяется напряже-

нием горения дуги $U_{\text{дуги}}$ и работой выхода электрона ϕ_e

$$U_k = 0,4(U_{\text{дуги}} - \phi_e). \quad (4)$$

Работа выхода электрона зависит от выбранного материала катода. Для титана $\phi_e = 3,57$ В. Значение напряжения горения вакуумной дуги в расчетах можно принять равным 2–3 величинам потенциала ионизации материала катода. Для сплавов Ti–Si $U_{\text{дуги}} = 24$ В и не зависит от содержания кремния [2]. Для большинства материалов $U_{\text{дуги}} = 20$ –30 В.

С учетом (4) уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$j_k = \frac{a}{0,4h_k} \frac{T_{\text{п}} - T_0}{U_{\text{дуги}} - \phi_e}. \quad (5)$$

При нахождении величины допустимой плотности ионного тока на катоде из уравнения (5) необходимо учесть, что для уменьшения капельной фазы в плазменном потоке $T_{\text{п}} < 0,3T_{\text{пл}}$. Данное требование обосновывается резким ростом капельной фазы при перегреве эродирующей поверхности катода [7]. Так как для охлаждения катодного узла в существующих вакуумных установках электродугового нанесения покрытий используется проточная вода, температуру охлаждаемой поверхности катода следует брать ниже температуры кипения воды ($T_0 < 373$ К). Кроме этого, для вакуумных электродуговых устройств с интегрально холодным катодом характерным является наличие критической величины тока дугового разряда (табл. 2), ниже которой получить устойчивое существование вакуумной дуги не представляется возможным [9]. Таким образом, для величины тока дугового разряда должно выполняться условие: $I_{\text{дуги}} > I_{\text{кр}}$.

Таблица 2

Значение критического тока дугового разряда в вакууме на катодах из разных материалов

Материал катода	Значение критического тока, А
Титан	80
Цирконий	90
Титан – кремний	45
Алюминий	60
Медь	80
Никель	90

При расчете предельного тока дугового разряда, при котором не наблюдается перегрев расходуемой части катода, необходимо учитывать, что доля ионного тока, приходящегося на поверхность упрочняемой заготовки, не должна превышать допустимой величины. Эта величина ограничивается предельной токовой нагрузкой на поверхность заготовки. Для определения зависимости величины предельно допустимого тока дугового разряда от высоты катода были приняты следующие расчетные данные [10]: средний заряд иона Z_i для титановой плазмы +1,6, для плазмы «титан – кремний» +1,2; заряд электрона $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл; скорость движения иона $v_i = 2 \cdot 10^4$ м/с; $U_k = 12$ В; $T_{п} = 550$ К; $T_0 = 350$ К.

Расчет проводили для разных значений высот катода h_k (от 0,02 до 0,05 м). Диаметр катода-мишени для большинства технологических плазменных устройств равен 0,08 м, следовательно, площадь эродирующей поверхности $S = 0,005$ м². В зависимости от материала катода (Ti, сплав TiSi, сталь 40X13) произведем расчет плотности максимального теплового потока на поверхность катода, плотности тока дугового разряда на катоде и допустимой концентрации ионов плазменного потока у поверхности катода. Концентрация ионов у поверхности катода, соответствующая плотности ионного тока дугового разряда:

$$n_i = \frac{j_k}{Z_i e v_i} \quad (6)$$

Как видно из табл. 3, с уменьшением температуры плавления катодного материала падают допустимые значения плотности тока дугового разряда и концентрации ионов у поверхности катода. Зависимость максимально допустимого тока дугового разряда от толщины и материала катода представлена на рис. 2.

Таблица 3

Результаты расчета параметров разряда для катода высотой $h_k = 0,05$ м

Материал катода	Максимальный тепловой поток, Вт/м ²	j_k , А/м ²	n_i , м ⁻³	$I_{дуги}$, А
Ti	$21 \cdot 10^3$	1,782	$3,475 \cdot 10^{18}$	89,00
Сплав TiSi	$21 \cdot 10^3$	0,895	$0,694 \cdot 10^{18}$	44,75
Сталь 40X13	$21 \cdot 10^3$	1,678	$4,369 \cdot 10^{18}$	83,90

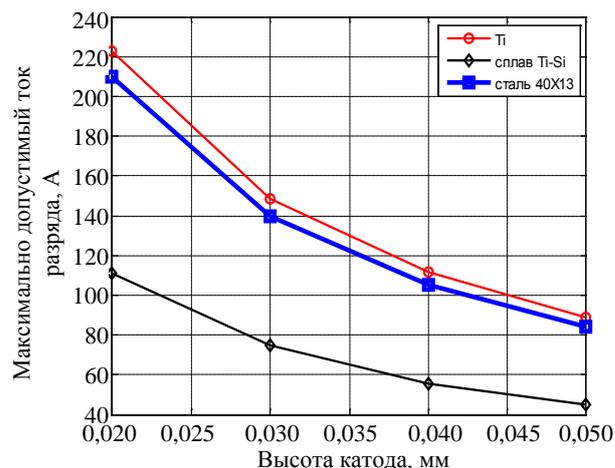


Рис. 2. Зависимость величины допустимого тока дугового разряда от толщины катода-мишени

Как показали расчеты, при $h_k = 0,05$ м для катодов-мишеней из всех рассмотренных материалов предельно допустимый ток дугового разряда, при котором разряд протекает с образованием минимального количества капельной фазы в плазменном потоке, практически равен величине минимального тока устойчивого горения дуги. Следовательно, при больших толщинах катода избежать перегрева эродирующей поверхности и как следствие уменьшения капельной фазы в потоке нельзя, так как для поддержания устойчивого разряда требуется установить величину разрядного тока, существенно большую, чем значение минимального тока устойчивого горения дуги.

ВЫВОД

Проведенные теоретические оценки позволяют выбрать толщину расходуемой части катода-мишени вакуумного электродугового источника плазмы, обеспечивающую образование минимального количества капельной фазы в потоке. При этом при малых h_k ток допустимого разряда может быть значительным и обеспечивать высокую производительность процесса нанесения покрытий при образовании относительно низкого количества капельной фазы в покрытии. При $h_k = 0,05$ м величина предельно допустимого тока дугового разряда, обеспечивающего формирование в потоке минимального количества капельной фазы, практически равна значению минимального тока устойчивого горения дуги.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Томаль, В. С.** Низкоэнергетический источник ионного ассистирования / В. С. Томаль, Н. К. Касинский, И. А. Иванов // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 67–69.
2. **Вакуумно-плазменные** покрытия / Ж. А. Мрочек [и др.]; под общ. ред. Ж. А. Мрочека. – Минск: Технопринт, 2004. – 369 с.
3. **Исследование** процессов формирования структуры вакуумных конденсатов в среде технологического газа / В. С. Томаль [и др.] // *Контенант.* – 2013. – Т. 12, № 4. – С. 16–21.
4. **Хороших, В. М.** Эрозия катода и расход массы катодного материала в стационарной дуге низкого давления / В. М. Хороших // *Физическая инженерия поверхности.* – 2005. – Т. 2, № 4. – С. 184–199.
5. **Хороших, В. М.** Пространственное распределение потоков частиц в стационарном дуговом разряде низкого давления / В. М. Хороших, М. Г. Холومهев // *Физическая инженерия поверхности.* – 2004. – Т. 2, № 6. – С. 167–170.
6. **Мрочек, Ж. А.** Исследование основных технологических параметров электродугового процесса формирования многокомпонентных кремнийсодержащих покрытий в вакууме / Ж. А. Мрочек, И. А. Иванов // *Электронная обработка материалов.* – 1996. – № 1. – С. 14–16.
7. **Дороднов, А. М.** Методика инженерно-физического расчета электродугового источника плазмы для процессов нанесения покрытий в вакууме / А. М. Дороднов, А. Н. Кузнецов, С. В. Леонтьев. – М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 1999. – 34 с.
8. **Daalder, J. E.** Cathode Sports and Vacuum Arc / J. E. Daalder // *Physica B+C.* – 1981. – Vol. 104, No 1–2. – P. 91–106.
9. **Ivanou, I. A.** Alternative Technologies of Metal Deposition and Its Mathematical Simulation / I. A. Ivanou, S. A. Sultan // *Машиностроение и техносфера XXI в.: сб. трудов: в 4 т.* – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Т. 4. – С. 241–244.
10. **Иванов, И. А.** Параметры низкотемпературной плазмы электродуговых испарительных устройств / И. А. Иванов, Х. Т. Е. Кармажи // *Труды VII симпозиума Беларуси и Сербии по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы (ФДП-VII'2008)*, Минск, 22–26 сент. 2008 г. / под ред. В. И. Архипенко, В. С. Буракова, А. Ф. Чернявского. – Минск: Ковчег, 2008. – С. 192–195.
1. **Tomal, V. S.,** Kasinsky N. K., & Ivanov, I. A. (2013) Low-Power Source of Ionic Assisting. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools.], 18 (1), 67–69 (in Russian).
2. **Mrochek, Zh. A.,** Vershina, A. K., Ivashchenko, S. A., Ivanov, I. A., Frolov, I. S., & Latushkina, S. D. (2004) *Vacuum-Plasma Coatings.* Minsk, Tekhnoprint. 369 p. (in Russian).
3. **Tomal, V. S.,** Kasinsky N. K., Ivanov, I. A., & Misnik, I. V. (2013) Investigations on Formation Processes of Vacuum Condensate Structures in Process Gas Medium. *Kontenant* [Contentant], 12 (4), 16–21 (in Russian).
4. **Khoroshikh, V. M.** (2005) Cathode Erosion and Cathode Material Mass Expenditure in Stationary Low-Pressure Arc. *Fizicheskaya Inzheneria Poverkhnosti* [Physical Engineering of Surface], 2 (4), 184–199 (in Russian).
5. **Khoroshikh, V. M.,** & Kholomeev, M. G. (2004) Spatial Distribution of Particle Flows in Stationary Low-Pressure Arc Discharge. *Fizicheskaya Inzheneria Poverkhnosti* [Physical Engineering of Surface], 2 (6), 167–170 (in Russian).
6. **Mrochek, Zh. A.,** & Ivanov, I. A. (1996) Investigations on Main Technological Parameters of Electric-Arc Formation Process of Multi-Component Silicon-Containing Coatings in Vacuum. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Treatment of Materials], 1, 14–16 (in Russian).
7. **Dorodnov, A. M.,** Kuznetsov, A. N., & Leontiev, S. V. (1999) *Methodology for Engineering and Physical Calculation of Electric-Arc Plasma Source for Coating Application Processes in Vacuum.* Moscow: Publishing House of MGTU Named After Bauman [Bauman Moscow State Technical University]. 34 p. (in Russian).
8. **Daalder, J. E.** (1981) Cathode Sports and Vacuum Arc. *Physica B+C*, 104 (1–2), 91–106. Doi: 10.1016/0378-4363(81)90040-1.
9. **Ivanou, I. A.,** & Sultan, S. A. (2004) Alternative Technologies of Metal Deposition and Its Mathematical Simulation. *Engineering and Technosphere of XXI Century. Collection of Papers. Vol. 4.* Donetsk: DonNTU [Donetsk National Technical University], 241–244.
10. **Ivanov, I. A.,** & Karmazhi, H. T. E. (2008) Parameters of Low-Temperature Plasma in Electric-Arc Evaporative Devices. *Proceedings of VII Symposium of Belarus and Serbia on Physics of Laboratory and Astrophysical Plasma (PDP-VII'2008)*, September 22–26, 2008. Minsk, Kovcheg Publ., 192–195 (in Russian).

Поступила 04.12.2014