

УДК 533.9.08, 621.039.66

## **Вакуумный электродуговой источник плазмы с анодным и катодным режимами горения разряда**

*А. Н. Кузнецов, Н. В. Прахов*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Приведены данные экспериментального исследования вакуумно-дугового источника плазмы, работающего в "горячем" режиме с распределенной электродной привязкой. Данное устройство позволяет работать в двух режимах горения разряда: с расходуемым анодом или расходуемым катодом. Для обоих режимов даны параметры разряда, а также температура электронов. Описанный источник плазмы представляет интерес для технологии обработки поверхностей материалов.*

В настоящее время в технологии получили широкое развитие метод поверхностной обработки материалов, основанный на вакуумно-дуговом разряде с эродирующим холодным катодом, и источники плазмы на его основе. Генерация рабочего вещества осуществляется на интегрально-холодном катоде ( $\sim 5 \cdot 10^2$  К) в катодных микропятнах с высокой плотностью тока ( $10^5 \div 10^6$  А/см<sup>2</sup>) и высокой температурой. Но данный метод обладает рядом недостатков, одним из главных является наличие в продуктах генерации микрокапельной фазы, которая сни-

жает качество получаемых изделий, а во многих случаях именно из-за этого данный метод вообще является неприемлемым. Для устранения данного недостатка применяют различные методы сепарации плазменных потоков от микрокапельной фазы, но эти средства, хотя и значительно снижают содержание нежелательной составляющей, не обеспечивают полное отсутствие микрокапель в плазменном потоке, попадающем на изделие, и к тому же сепараторы значительно снижают КПД источника.

Существуют другие типы вакуумно-дугового разряда, которые работают в "горячем" режиме с генерацией рабочего вещества с испаряемого катода [1] и анода [2]. Их главное достоинство — отсутствие микрокапельной фазы в продуктах генерации. Но им присущ ряд недостатков, в частности, для катодного режима [1] применяется тугоплавкий тигель, что приводит к усложнению конструкции и отравлению рабочего материала примесями самого тигля. Кроме того, зажигание разряда происходит в "холодном" режиме с генерацией материала в микропятнах, который по мере разогрева переходит в "горячий" режим с распределенной катодной привязкой. Как следствие, необходимо предусматривать меры защиты изделий от микрокапель до того, как разряд перейдет в "горячий режим", а также вводить систему поджига разряда, что дополнительно усложняет конструкцию. В анодном режиме [2] используется конструкция с радиационно-охлаждаемой открытой геометрией, которая увеличивает тепловые потери, что снижает КПД источника.

Целью работ — необходимость создания и исследования источника плазмы, в котором отсутствуют указанные недостатки.

Предлагается вакуумно-дуговой источник плазмы, позволяющий работать в двух режимах генерации рабочего вещества — анодном [1] и катодном [2]. Конструктивно источник (рис. 1) представляет собой коаксиальную систему электродов 1 и 2 и снабжен экранами, снижающими потери тепла на водоохлаждаемой конструкции. Центральный электрод выполняется из материалов с высокой упругостью насыщенных паров. В обоих случаях горения разряда испарение материала с центрального электрода осуществляется из твердой фазы при температуре, несколько ниже температуры плавления. Для уменьшения потерь тепла в конструкцию он крепится на тонкой вольфрамовой шпильке. При использовании материалов с низкой упругостью насыщенных паров необходимо применять тугоплавкие тигли. Локализация источника пара внутри кольцевого электрода позволяет поддерживать в его полости давление рабочего вещества, необходимое для существования самостоятельного разряда. Для зажигания разряда включается основной источник питания постоянного тока 4, а кольцевой электрод, выполненный из тантала, разогревается специальным источником накала переменного тока 3 до температуры ~2000 К. За счет излучения нагревается центральный электрод до температуры, при которой локальное давление паров (1—10 Па) превышает критическое, при этом происходит зажигание вакуумно-дугового разряда, горящего в продуктах эрозии центрального электрода. Далее внешний накал с кольцевого электрода снимается, и разряд переходит в самостоятельный режим, при этом тем-

пература кольцевого электрода снижается до ~1500 К. Разряд в обоих режимах горит спокойно, без скачкообразных колебаний параметров, характерных для "холодной" дуги.

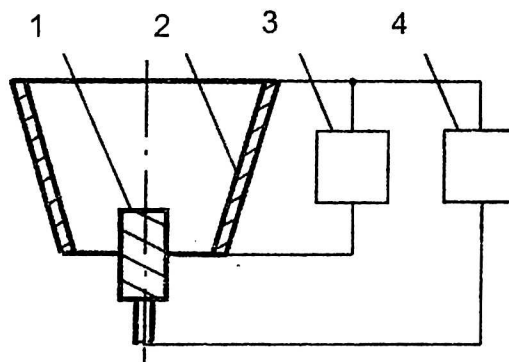


Рис. 1. Схема источника плазмы

Данное устройство позволяет реализовать разряд двух видов простым переключением одного и того же источника питания, т. е. разряд существует или с центральным анодом и кольцевым катодом, или с центральным катодом и кольцевым анодом. При этом для первичного зажигания разряда нет необходимости подавать в межэлектродный промежуток аргон [2]. При последующих зажиганиях осевший на кольцевом электроде материал центрального электрода способствует более быстрому зажиганию разряда.

Следует отметить, что процесс зажигания анодного режима в представленном источнике происходит несколько проще. В этом режиме ниже критический ток и напряжение горения разряда, хотя при этом выше массовый расход рабочего материала и ниже степень ионизации. В анодном режиме, в отличие от катодного, степень ионизации уменьшается с увеличением разрядного тока за счет прироста паровой составляющей генерируемого вещества. Использование источника плазмы с двумя режимами работы позволяет использовать для обработки поверхностей преимущества обоих случаев. В анодном режиме значительно больше расход рабочего вещества и, как следствие, скорость нанесения покрытия, в катодном режиме — выше степень ионизации продуктов генерации и, как следствие, улучшается возможность управлять ими для повышения качества покрытий.

На графиках (рис. 2—4) показаны данные экспериментов, выполненных при использовании хрома в качестве материала для центрального электрода при давлении  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  торр. На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика разрядов в анодном (А) и катодном (К) режимах. На рис. 3 и 4 приведены зависимости степени ионизации и секундного массового расхода для анодного и катодного режимов от разрядного тока. Измерения, проведенные с помощью цилиндрического вольфрамового зонда,

показали, как и в дуговых разрядах с термоэмиссионными полыми катодами, две группы электронов.  $T_e$  в катодном и анодном режимах: первая группа — 1–2 и 1–1,5 эВ, вторая — 10–12 и 14–16 эВ, соответственно. Так же, как и в [1, 2], механизм эмиссии неясен. Ток дуги при измеренных температурах на несколько порядков ( $10^3$ – $10^5$ ) превышает величину тока термоэмиссии  $I_e$ , рассчитанную по формуле Ричардсона.

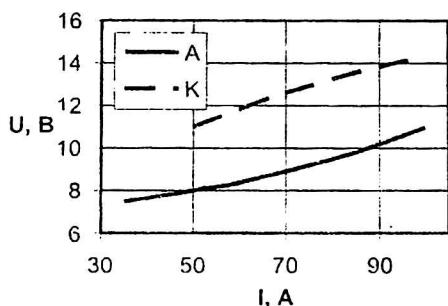


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика

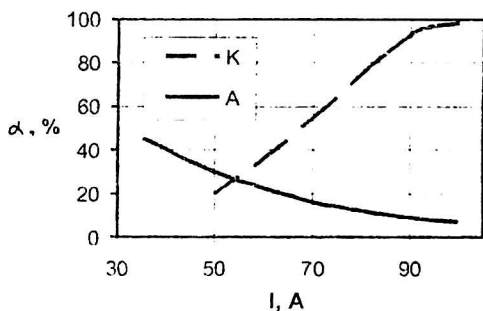


Рис. 3. Степень ионизации

Исследованный источник плазмы обладает рядом преимуществ, необходимых в производстве и научно-исследовательских разработках. Это возможность использования двух режимов горения разряда (фактически двух разных устройств, объединенных в одно), что существенно расши-

ряет область применения; отсутствие микрокапельной фазы в продуктах генерации источника,

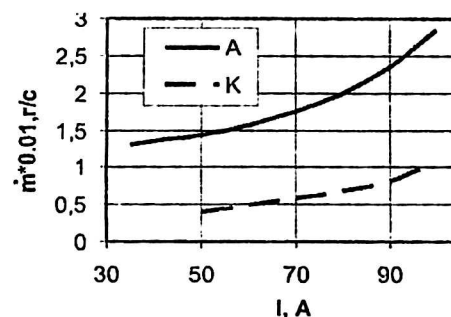


Рис. 4. Секундный массовый расход

повышающее качество наносимых покрытий и увеличивающее возможности применения данного устройства; конструкция с относительно несложными элементами; простые низковольтные источники питания; отсутствие сложных и ненадежных механизмов поджига разряда.

#### Литература

1. Васин А. И., Дороднов А. М., Петросов В. А. О существовании вакуумной дуги с распределенным разрядом на расходомером катоде// Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 24. С. 1459–1505.
2. Дороднов А. М., Кузнецов А. Н., Петросов В. А. О новом типе вакуумной дуги в парах анода с нерасходуемым полым катодом// Там же. Т. 5. № 16. С. 1001–1006.
3. Паранин С. Н., Полищук В. П., Сычев П. Е., Шабанов В. И., Ярцев И. М. Экспериментальное исследование теплового режима работы горячего испаряющегося катода в стационарной вакуумной дуге с диффузной катодной привязкой// ТВТ, 1986. Т. 24. № 3. С. 422–429.
4. Полищук В. П., Ярцев И. М. Вакуумные дуги на испаряющихся горячих анодах// Там же, 1996. Т. 34. № 3. С. 385–391.
5. Erich H.J., Haase B., Muller K. G., Shmidt R.// J. Vac. Sci. Technol., 1988. V. A6(1). P. 134.

## Vacuum arc plasma source with anodic and cathodic regime of discharging

A. N. Kuznetsov, N. V. Prakhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The following experimental data of researching vacuum arc plasma source working in heat regime with distributed electrode fixation. This device allows to working with two different regimes: either with consumed anode or consumed cathode. The parameters of discharge and electron temperature are given for both regimes. The plasma source, which is described in this article, is of interest of surface treatment technology of materials.*