

К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ВАКУУМНЫМ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ И ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худайкулов, Б.Р. Кахрамонов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Дурмон йули 33, 100125,
Ташкент, Узбекистан; arustamov@aiie.uz
(Получена 20.04.2018)

Вакуум-ёй разряди асосида плазма оқимни самарали вужудга келишининг функционал схемаси вакуум-ёй разрядини қўзғалиши билан характерланади, катод юзасида вакуум-ёйининг катод доғлари билан ўзаро таъсири, унинг катод юза қисмида турғунлаштириш, электродлардан иссиқлик ўтказиш ва конструктив қисмларда иссиқлик тизимини таъминлаш концепцияси таклиф қилинди.

Предложена концепция формирования эффективной генерации плазменного потока вакуумно-дуговым разрядом, в основе которой лежат функциональные системы иницирования вакуумного дугового разряда с необходимыми характеристиками, генерации потока эродированного материала в области взаимодействия катодных пятен вакуумной дуги с рабочей поверхностью катода, их стабилизации в рабочей зоне на поверхности катода, отвода тепла от электродов и конструктивных элементов, обеспечивающих их тепловой режим.

A concept is proposed of forming the effective generation of a plasma flux by a vacuum-arc discharge in a substrate, with the functional systems of initiation of a vacuum-arc discharge with the necessary characteristics; generation of a stream of eroded material in the region of interaction of cathode spots of the vacuum-arc with the cathode working surface; their stabilization in the working area on the cathode surface, removal of heat from the electrodes and structural elements providing the thermal regime of them.

Генерация потоков металлической плазмы на основе вакуумно-дугового разряда является эффективным методом, обеспечивающим решение научных и технологических задач [1-6]. Однако цельной системы основ конструирования вакуумно-дуговых плазменных источников пока нет. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены задачи, требующие своего решения при конструировании вакуумно-дуговых источников плазмы. В предлагаемой концепции вакуумно-дуговой источник плазмы (ВДИП) рассматривается как система, в которой выполняется генерация плазменного потока материала катода. Для ее реализации необходимо выполнение следующих задач: иницирование вакуумного дугового разряда с необходимыми характеристиками; формирование взаимодействия катодных пятен вакуумной дуги с рабочей поверхностью катода, обеспечивающего генерацию потока эродированного материала (при этом должна осуществляться стабилизация дугового разряда на поверхности катода); отвод тепла от электродов и элементов конструкции, обеспечивающих тепловой режим.

Для реализации этих внутренних функций формируются подсистемы ВДИП:

– электрическая подсистема, включающая основные и вспомогательные электроды (инициация разряда), изоляторы, присоединительные элементы к источникам электропитания;

– система охлаждения, включающая рубашки охлаждения теплонапряжённых элементов конструкции, каналы потока охлаждающей среды, уплотнения, присоединительные элементы к внешней системе отвода тепла;

– магнитная система со стабилизирующими фокусирующими катушками.

Конструкция ВДИП разделена на несколько узлов по функциональным признакам, в которых размещаются все функциональные элементы систем. Плазмотроны классифицируются на самоустанавливающиеся и с фиксированной длиной вакуумного дугового разряда. На рис. 1 представлена схема реализации вакуумного дугового разряда в закрытой и открытой электродной системе по отношению к изделию.

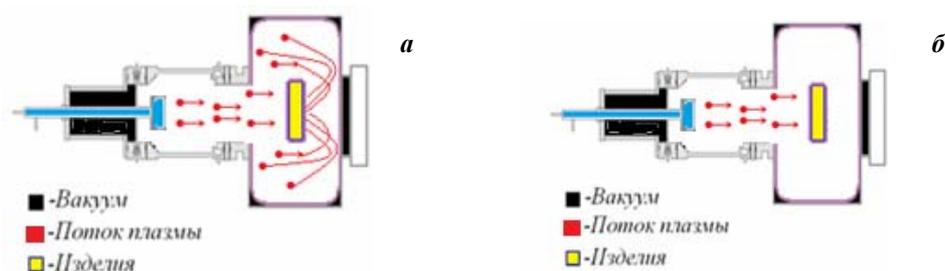


Рис. 1. Схема реализации вакуумного дугового разряда в закрытой и открытой электродной системе.

В электродной системе с анодом-камерой (рис. 1а) реализуется вакуумный дуговой разряд с нефиксированной длиной дуги. В электродной системе, представленной на рис. 1б, анодом является конструктивный элемент электродной системы источника плазмы, реализуется вакуумно-дуговой разряд с фиксированной длиной плазменного разрядного столба, имеющий стабильные параметры. Каждая система имеет свои преимущества и области эффективной реализации.

Исследование эродированного потока материала катода проводили в электродных системах, схематический вид которых представлен на рис. 2. Анодом является цилиндрический электрод, встроенный в его конструкцию. Конструкция вакуумного дугового источника плазмы обеспечивает формирование дугового разряда с интегрально «холодным» катодным пятном при токах разряда $J_g = 100-400$ А и давлении остаточной среды в вакуумированном пространстве $p = 10^{-2}-10^{-3}$ Па. Напряжение источника электрического питания разряда составляет 80 В, падение напряжения на электродах в режиме функционирования – 15–18 В.

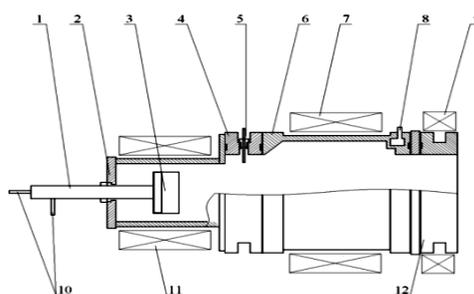


Рис. 2. Принципиальная схема вакуумного дугового источника плазмы: 1 – токоподвод, катодный держатель, 2 – катодный узел; 3 – катод; 4 – секция поджига дуги, 5 – поджиг, 6 – анод, 7 и 11 – стабилизирующие катушки; 8 и 10 – системы водяного охлаждения анода и катода, 9 – фокусирующая катушка, 12 – высоковольтный электрод.

Пространственное распределение плотности эродированного потока в относительных единицах при различных расстояниях от катода приведено на рис. 3а. Зависимость имеет спадающий характер и не соответствует закону косинуса. С увеличением расстояния от плоскости катода возрастает полуширина кривых распределения. Поток испаренных атомов в плазменном потоке может быть представлен в виде

$$G \approx N_a v_a m_a, \quad (1)$$

отсюда

$$N_a \approx Q / m_a v_a. \quad (2)$$

С учетом скорости атомов $v_a = 5 \times 10^4 - 10^5$ см/с и массы $m_a \approx 10 - 22$ г получим $N_a \approx 2 \times 10^{15} - 10^{16}$ см³. Отсюда следует, что длина свободного пробега составляет $\lambda \approx 1 - 5$ см, на расстояниях от плоскости катода, больших λ , частицы испытывают столкновения во время полета.

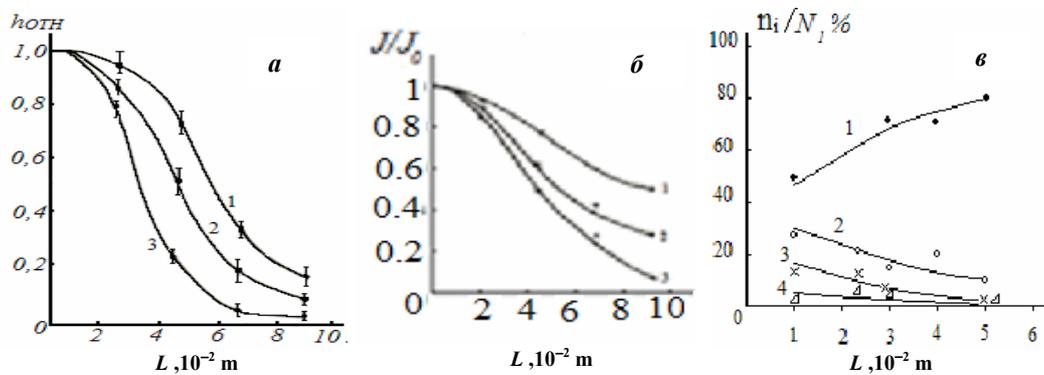


Рис. 3. Пространственное распределение относительной плотности эродированного потока (а); плотности ионного тока в эродированном потоке стали (б) на различном расстоянии от плоскости катода: кривая 1 – $R=15$ см; кривая 2 – $R=19$ см; кривая 3 – $R=23$ см; а также распределение микрочастиц по размерам (в): 1 – размер капель до 4 мкм, 2 – размер капель 4–8 мкм, 3 – размер капель 8–12 мкм и 4 – 12–16 мкм. Ток разряда – 150 А

Зависимость плотности ионного тока на расстояниях 15.0–23.0 см от плоскости катода для стали представлена на рис. 3б. С увеличением расстояния R от катода полуширина кривых распределения плотности ионного тока уменьшается, что означает уменьшение относительной плотности в периферийных частях потока с увеличением расстояния от катода. С увеличением расстояния R от катода плотность ионного тока уменьшается. Экспериментальные кривые описываются формулой для тока разряда 90 А $IR^2=10^3$ А/см², для 130 А $IR^2=3.25 \times 10^3$ А/см² и для 150 А $IR^2=5.5 \times 10^3$ А/см² и указывают на то, что зависимость плотности ионного тока от расстояния описывается законом $1/R^2$.

Учитывая, что для металлов коэффициент конденсации близок к единице [7-8], плотность эродированного потока можно определить из следующего соотношения:

$$\Gamma = \Delta m / S \Delta t m_a. \quad (3)$$

Поток ионов можно определить из соотношения $\Gamma_i = j_i / g_i$, где j_i – плотность ионного тока, g_i – заряд иона. С учетом соотношения (3), определяющего плотность

эродированного потока, степень ионизации плазменного потока вакуумного дугового разряда определяется выражением:

$$f = \Gamma_i / \Gamma = j_i S t m_a / g_i \Delta m . \quad (4)$$

В предположении однозарядности ионов степень ионизации при токе разряда 100 А составляет 15% , а при увеличении тока до 150 А возрастает до 30%. При этом средняя энергия ионов варьирует в пределах 10–12 эВ, а температура электронов при давлении остаточной среды 10^{-3} Па составляет 4–6.5 эВ.

Формируемый эродированный поток материала катода характеризуется следующими параметрами: концентрация электронов на выходе из вакуумно-дугового источника до 10^{14} см³, температура электронов 6–8 эВ, энергия ионов до 10–12эВ.

Высокая степень ионизации эродированного потока создает условия для управления структурой осаждаемого покрытия путем выбора оптимальной энергии конденсирующих заряженных частиц и скорости осаждения материала, определяющих свободную энергию скопления новой фазы капель в эродированном потоке, что характерно для всех форм дугового разряда. На рис. 3в приведено распределение капель по размерам в зависимости от расстояния от катода. На значительном расстоянии от катода происходит рост мелких микрочастиц, а количество более крупных частиц уменьшается. При этом разброс значений достаточно высокий, не менее 20%. Наблюдается уменьшение общего количества частиц с расстоянием от катода.

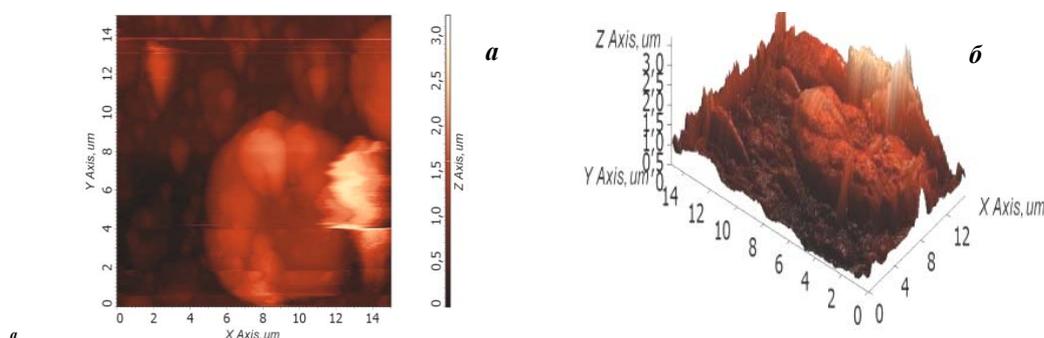


Рис. 4. Фотографии поверхности покрытия из нержавеющей стали, нанесенного на металлическую подложку вакуумным дуговым источником плазмы, полученные на сканирующем зондовом микроскопе NT-MDT: *а* – двухмерное изображение, *б* – трехмерное изображение.

Из приведенных фотографий (рис. 4) следует, что покрытия имеют мелкодисперсную изотропную структуру. Очаговые вкрапления, зоны с нарушением сплошности покрытия, проколы и другие нарушения отсутствуют, что указывает на пространственную однородность эродированного потока вакуумного дугового источника плазмы. Как указывалось ранее, присутствуют микрочастицы, распределенные по поверхности. Сравнение полученных спектров, представленных на рис. 5, показывает, что качественный состав медного пленочного покрытия и металлического образца меди соответствуют друг другу.

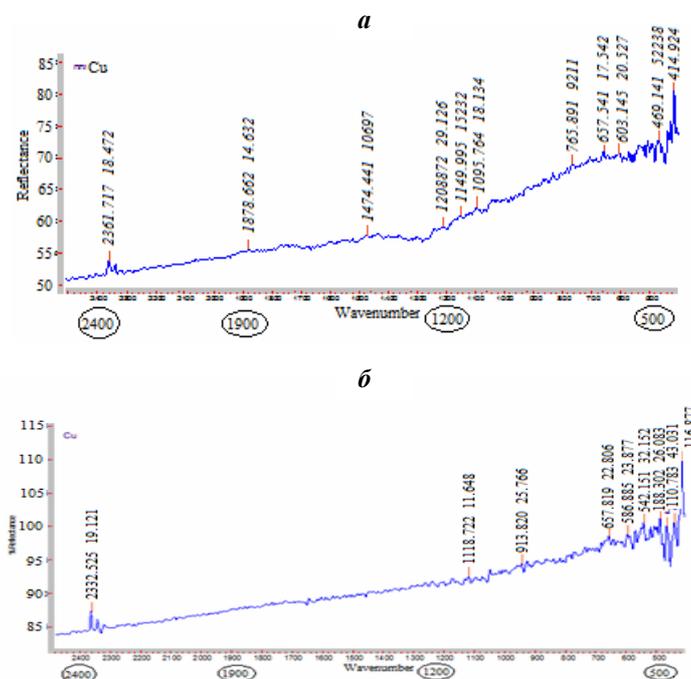


Рис. 5. ИК-спектры пленочного покрытия из меди на подложке из стали (а) и медного металлического образца (б).

Пики в спектре, характеризующие наличие основных элементов, присущих составу наносимого медного покрытия, практически идентичны. Таким образом, процессы генерации плазменного потока в разработанном вакуумном дуговом источнике плазмы, транспортировка и осаждение материала на подложку существенно не влияют на соотношение элементов в потоке плазмы и их количество.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Г. Кесаев. Катодные процессы электрической дуги (Москва, Наука, 1968).
2. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology: Fundamentals and Applications, R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin (Eds) (Park Ridge, NJ: Noyes Publ., 1995).
3. B.J. Jüttner, Phys. D: Appl. Phys. **34**, R103 (2001).
4. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition. Ed. A. Anders (John Wiley & Sons, Inc., NY, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000).
5. И.И. Аксёнов. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы (Харьков, НИЦХ ФТИ, 2005).
6. A. Anders, Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation (Springer Science and Business Media, LLC, 2008).
7. V.N. Arustamov, Kh.B. Ashurov, Kh. Kadirov, and Kh. Khudaikulov, Journal of Surface Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques **8**, No.3, 573 (2014)..
8. V.N. Arustamov, Kh.B. Ashurov, Kh.Kh. Kadirov, R.B. Nagaybekov, and I.Kh. Khudaykulov, Journal of Surface Investigation. X_ray, Synchrotron and NeutronTechniques **8**, No.4, 828 (2014).