

# Управление режимами генерации источника плазмы протяженной конструкции

В. Т. Барченко<sup>1</sup>, Д. М. Репеева<sup>1</sup>, А. А. Лисенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
197376 Россия, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН)  
199178 Россия, Санкт-Петербург  
e-mail: vtbarchenko@yandex.ru

Проведены исследования работы вакуумно-дугового источника протяженной конструкции. Выявленные закономерности развития дугового разряда позволили управлять режимами генерации испарителя и обеспечить как надежную фиксацию катодных пятен на рабочей поверхности, так и ускоренный выход катода в рабочий режим.

В последнее время широкое применение получила технология нанесения покрытий в вакууме. Из наиболее перспективных является метод, использующий потоки металлической плазмы, генерируемой вакуумно-дуговым разрядом с интегрально-холодным катодом. Данный тип технологического оборудования обеспечивает высокую эффективность при получении ионизированных и высокоскоростных потоков вещества, открывает возможности управления технологическим процессом нанесения покрытий из плазмы различных чистых металлов, осуществления плазмохимического синтеза простых и сложных соединений, воспроизведения сплавов и получения сложных комбинированных покрытий, а также проведение как ионного распыления обрабатываемой поверхности, так и легирования приповерхностного объема.

Вакуумно-дуговой разряд – это самостоятельный разряд, развивающийся в парах материала катода. Эмиссионным центром разряда является катодное пятно, характеризующееся малыми размерами, в котором за очень короткое время возникает температура, достигающая температуры кипения, что и обуславливает интенсивное распыление (разрушение) материала катода, обеспечивающее высокую эффективность генерационных процессов в разряде.

Для области катодного пятна на материале катода характерны быстрые фазовые переходы из твердого состояния в жидкое, газообразное и плазменное. При этом также сле-

дует различать плотную неидеальную, умеренно разряженную и бесстолкновительную плазмы. Для описания взаимодействия интенсивного потока заряженных частиц с поверхностью катода необходимо решать систему уравнений, содержащую уравнения движения для заряженных частиц и уравнения механики сплошной среды.

Многофакторность рассматриваемого физического процесса и комбинированная взаимосвязь между отдельными параметрами обуславливают сложность его математического моделирования (рис. 1).

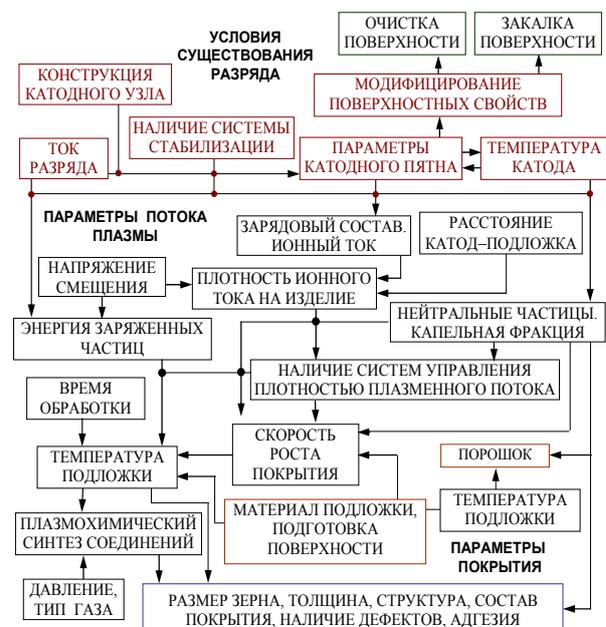


Рис. 1. Схема взаимосвязи параметров, определяющих области применения вакуумно-дугового разряда на интегрально-холодном катоде

Процессы в дуговом разряде подразделяются:

- на генерационные, протекающие в катодном пятне (в расплавленном слое жидкого металла) и оказывающие воздействие как на поверхность катода, так и на параметры плазмы;
- в прикатодной области, определяющие условия генерации, динамику развития и перемещения катодных пятен;
- в зоне транспортировки – в межэлектродном пространстве, начиная от области с сильно неидеальной низкотемпературной плазмой.

Технологическое вакуумно-дуговое устройство выполняет свое функциональное предназначение лишь в том случае, если зоной вероятного существования пятна является рабочая поверхность катода.

Управление катодными пятнами и повышение надежности их удержания в заданной зоне эрозии являются одними из самых актуальных проблем при разработке источников плазмы с интегрально-холодным катодом.

В [1] представлена конструкция протяженного источника плазмы с внешней магнитной системой стабилизации, предназначенная для обработки длинномерных или крупногабаритных изделий, работающего в импульсном режиме и формирующего направленный ленточный поток.

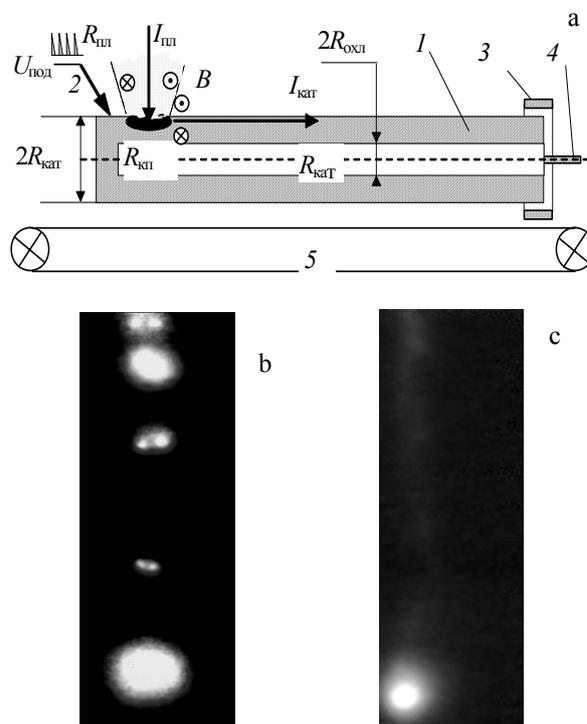
Источник состоит из протяженного цилиндрического катода, дугогасящего экрана, произвольно расположенного со стороны токового ввода, анода и протяженной магнитной системы, ориентированной вдоль катода.

На рабочей поверхности катода у поджигающего электрода формируются катодные пятна, которые в магнитном поле петлевой обмотки перемещаются к токовому вводу. При попадании катодных пятен в зазор между катодом и дугогасящим экраном происходит погасание вакуумно-дугового разряда.

В [2] показано, что в первоначальный момент времени на поверхности катода возникают неуправляемые скоростные катодные пятна, которые, даже при наличии внешнего магнитного поля, осуществляют хаотические перемещения по поверхности катода с целью его очистки, в том числе и на его нерабочей части. Такой режим работы является аварийным и загрязняет обрабатываемые детали.

Для устранения данного недостатка катод снабжен дополнительным тонкостенным, электрически изолированным экраном, охватывающим поверхность катода, с образованием продольного окна, формирующего рабочую поверхность на катоде от поджигающего электрода до дугогасящего экрана.

В процессе работы исследовался протяженный вакуумно-дуговой источник плазмы, работающий в импульсном режиме и формирующий направленный ленточный поток. Источник состоял из цилиндрического катода 1, инициирующего электрода 2, дугогасящего экрана 3, расположенного со стороны токового ввода 4 и протяженной магнитной системы 5, ориентированной вдоль катода и установленной с противоположной стороны относительно генерируемого потока плазмы (рис. 2а). Функции анода выполняют стенки вакуумной камеры. Конструкция магнитной системы выполнена таким образом, чтобы краевые эффекты не искажали прямолинейного характера перемещения катодных пятен на начальном и конечном участках движения, а распределение индукции по рабочей поверхности катода было однородно [3].



**Рис. 2.** Перемещение катодного пятна по рабочей поверхности катода (а) и зафиксированные моменты перемещения катодных пятен на холодном катоде (b) и на катоде с рабочей температурой (c)

Катодное пятно, являющееся источником первичных электронов и основанием столба дуги, формируется на рабочей поверхности катода 1 в области поджигающего электрода 2. При условии движения в скрещенных электрическом  $\vec{E}$  и магнитном  $\vec{B}$  полях [4] оно смещается в сторону максимума индукции магнитного поля  $\Sigma\vec{B} = \vec{B}_{\text{пл}} + \vec{B}_{\text{кат}}$  к токовому вводу 4. Собственное поле дугового канала  $\vec{B}_{\text{пл}}$ , создаваемое током, протекающим в плазме  $\vec{I}_{\text{пл}}$ , изменяется от нуля в приосевой области до максимума на периферии привязки, дополняется магнитным полем  $\vec{B}_{\text{кат}}$ , создаваемым током, протекающим по катоду  $\vec{I}_{\text{кат}}$ . При попадании катодного пятна в зазор между катодом 1 и дугогасящим экраном 3 происходит погасание дугового разряда. Интервал между поджигающими импульсами больше или равен среднестатистическому времени жизни катодных пятен на поверхности катода (см. рис. 2а).

В процессе работы выделено два типа разряда, характеризующиеся различными условиями существования: разряд на загрязненных участках рабочей поверхности; основной дуговой разряд с материала катода.

В первоначальный момент времени на рабочей поверхности катода 1 из-за наличия поверхностных загрязнений возникает неуправляемый разряд, охватывающий всю поверхность.

После удаления поверхностных загрязнений развивается разряд с материала катода, условия поддержания которого определяются рабочей температурой катода. В этом случае характер перемещения катодных пятен «упорядочивается» и начинает проявляться их преимущественное перемещение в направлении токового ввода.

Катодное пятно – точечный источник тепла, нагревающий катод по пути своего перемещения. Выделяющееся тепло распространяется в основном в направлении, перпендикулярном оси перемещения.

При расчете катодное пятно как тепловой источник воздействия на поверхность катода моделируется в форме круга радиусом  $R$ , в пределах которого тепловой поток, подводимый из разряда и взаимодействующий с

поверхностью, постоянен для любого момента времени  $-\lambda(dT/dh)_{h=0} = q$ , а вне него – равен нулю. Катодное пятно включает в себя следующие характерные области: испаряющая зона; нижняя граница кипения, нижняя граница жидкой фазы, граница прогрева области у катодного пятна до температуры, обеспечивающей протекание тока за счет термоэлектронной эмиссии и контактная поверхность раздела паровой фазы и плазмы.

Катод, толщиной  $dh = R_{\text{кат}} - R_{\text{охл}}$ , по отношению к эффективному размеру источника тепла, можно считать полубесконечным телом, поэтому на бесконечном удалении от поверхности тепловой поток равен нулю, а температура постоянна  $(dT/dh)_{h=0} = 0$ ;  $(dT/dh)_{h=\infty} = 0$ ;  $T_{h=\infty} = T_0$ . В исходном состоянии температура поверхности катода одинакова во всех точках:  $T_{t=0} = T_0$ .

Для расчета поля температур при воздействии теплового источника использовалось расчетное соотношение

$$T(h,t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \left( \text{ierfc}(h/\sqrt{4at}) - \text{ierfc}(\sqrt{h^2 + R^2}/2\sqrt{at}) \right)$$

$$\text{ierfc}(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x \text{erfc}(x),$$

где  $h$  – глубина прогрева;  $a = \lambda/\rho c$  – коэффициент температуропроводности;  $\text{ierfc}$  – интегральная форма функции ошибок Гаусса.

При движении катодного пятна во все последующие моменты времени оно перемещается на менее прогретый участок катода, поэтому его скорость определяется уровнем подводимой мощности и временем достижения в разогреваемой катодной ячейке рабочей температуры, необходимой для воспроизводства необходимого количества испаряемого материала в единицу времени. Время, затрачиваемое на разогрев катода до необходимой температуры, определяется исходной температурой катода и мощностью подводимой из разряда, а температура и размеры катодного пятна являются регулятором, управляющим испарением атомов и отвечающим за условия поддержания разряда.

Непрерывное перемещение катодных пятен по ограниченной рабочей поверхности катода приводит к установлению на ней неко-

торой средней равновесной температуры, определяемой его геометрическими размерами и условиями охлаждения.

На рис. 2*b*, с представлен характер перемещения катодных пятен по рабочей поверхности при разных температурах катода.

В процессе работы установлено, что при токе разряда 200 А максимальное время  $\tau$  существования катодных пятен на рабочей поверхности водоохлаждаемого циркониевого катода длиной 0,45 м и диаметром 0,06 м превышало 100 мс. При этом сокращение длительности токовых импульсов было связано с увеличением рабочей температуры катода.

По мере повышения температуры катода скорость перемещения катодных пятен по рабочей поверхности увеличивается (см. рис. 2*c*).

Рассмотренные условия работы технологического устройства протекают при разрядном токе  $I_{\text{раб}}$ , обеспечивающем стабильное горение разряда в рабочем режиме. Однако в этом случае, в первоначальный момент времени, при удалении поверхностных загрязнений с рабочей поверхности катода создаются благоприятные условия для перехода катодных пятен на экран, что приводит к созданию аварийной ситуации.

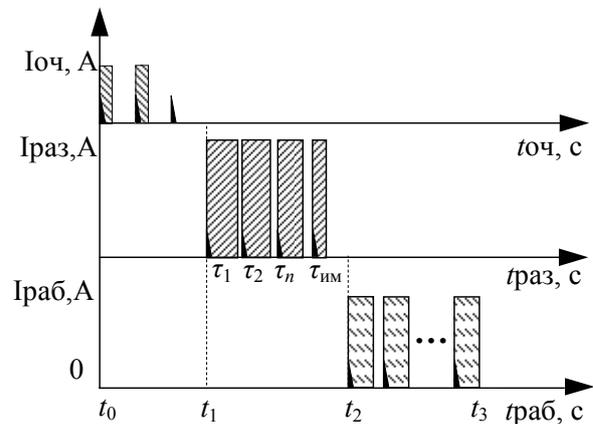
В свою очередь, выбранная величина разрядного тока  $I_{\text{раб}}$  при разогреве массивного катода и выхода испарителя в рабочий режим приводит к тому, что не все токовые импульсы доходят до дугогасящего экрана, это приводит к неравномерной выработке материала катода.

Для надежной фиксации катодных пятен на рабочей поверхности катода и ускоренного выхода катода в рабочий режим были определены условия существования разряда на каждом этапе: I – удаление загрязнений с поверхности катода; II – вхождение в режим; III – режим напыления.

Отсчет длительности токовых импульсов осуществлялся от момента срабатывания инициирующего электрода 2, генерирующего импульсы ( $U_{\text{под}}$ ) с заданной частотой (рис. 3).

При срабатывании поджигающего электрода, в первоначальный момент времени  $t_0$  (см. рис. 3), на рабочей поверхности катода из-за наличия поверхностных загрязнений возни-

кает неуправляемый разряд. Каждый материал характеризуется теплофизическими свойствами и своим значением минимально критического тока, способным поддерживать разряд. Область катодного пятна, являясь сосредоточением тепла, обуславливает интенсивное испарение материала катода.



**Рис. 3.** Диаграммы работы испарителя: I –  $t_0 - t_1$  (режим очистки); II –  $t_1 - t_2$  (режим выхода в рабочий режим); III –  $t_2 - t_3$  (рабочий режим)

Величина тока дугового разряда определяет количество пятен, одновременно существующих на рабочей поверхности катода. На тонкопленочных покрытиях загрязнений, состоящих из окисных пленок и диэлектрических включений, ток, замыкающийся на каждое катодное пятно, составляет всего лишь несколько ампер.

Наличие поверхностных примесей и дефектов даже при малой их концентрации оказывают значительное влияние на термоэмиссионные свойства металлов и приводят к заметному разбросу значений работы выхода (более 0,1 эВ). Данные условия существенно облегчают поддержание развивающегося разряда, способного существовать при более низком значении разрядного тока, чем основной дуговой разряд с материала катода. Поэтому при проведении режима очистки рабочей поверхности катода в первоначальный момент времени ток разряда  $I_{\text{оч}}$  выбирается существенно меньше величины тока, минимально критического для материала катода  $I_{\text{крит}}$ .

Удаление поверхностных загрязнений дуговым разрядом происходит в промежуток

времени  $t_0 - t_1$  при токе  $I_{\text{оч}} < I_{\text{раб}}$  (см. рис. 3).

После удаления загрязнений, при последующих попытках возбуждения разряда при выбранной величине тока  $I_{\text{оч}}$  разряд на рабочей поверхности катода не возникает.

Во все последующие режимы работы дуговой разряд будет существовать только в парах материала катода и для его поддержания необходимо увеличение тока разряда до величины, как минимум  $I_{\text{крит}}$ .

Время, затрачиваемое на разогрев катода до необходимой температуры, определяется исходной температурой катода и мощностью, подводимой из разряда. Таким образом, скорость перемещения катодных пятен будет определяться температурой катода и скоростью перемещения теплового потока впереди пятна.

Увеличение температуры катода в процессе работы приводит к сокращению времени становления основного дугового разряда в последующих импульсах.

На рис. 3 показано, что первые токовые импульсы в режиме разогрева катода, имеют большую длительность  $\tau$ , которая уменьшается  $\tau_1 > \tau_2 > \tau_n > \tau_{\text{им}}$ , достижение импульса оптимальной длительности  $\tau_{\text{им}}$  определяется временем прохождения расстояния от поджигающего электрода до дугогасящего экрана.

Для сокращения интервала времени  $t_1 - t_2$ , за которое достигается рабочая температура катода, величина тока разряда выбирается из условия  $I_{\text{раз}} > I_{\text{раб}}$ .

После установления на катоде рабочей температуры в промежуток времени  $t_2 - t_3$  протекает процесс напыления покрытия при токе  $I_{\text{раб}}$ , определяемом конструкцией дугового разряда, расстоянием катод – подложка и количеством обрабатываемых изделий.

Примером реализации предлагаемого вакуумно-дугового источника плазмы с протяженным цилиндрическим катодом является технологическое устройство с длиной катода 450 мм, работающее в импульсном режиме. Питание дугового разряда осуществляется от источника постоянного тока, в электрическую цепь которого включен аналоговый блок,

управляющий коммутатором, обеспечивающим поочередное его подключение к выбранным режимам работы: режим *I* обеспечивает протекание в электрической цепи тока очистки  $I_{\text{оч}}$ ; режим *II* обеспечивает протекание тока разогрева катода  $I_{\text{раз}}$ ; режим *III* обеспечивает протекание рабочего тока  $I_{\text{раб}}$ , выбираемого из условий стабильности горения разряда и определяемого конструкцией катодного узла, материалом катода, расстоянием между электродами катодом и анодом.

Величина разрядного тока  $I_{\text{раб}} = 200$  А, частота следования импульсов 3 Гц. Выбранные режимы работы: *I* – режим очистки  $I_{\text{оч}} = 100$  А; *II* – режим разогрева катода  $I_{\text{раз}} = 300$  А; *III* – режим напыления  $I_{\text{раб}} = 200$  А.

Таким образом, исследования вакуумно-дугового источника плазмы, работающего в импульсном режиме и генерирующего направленный ленточный поток, позволили на основе выявленной закономерности развития дугового разряда установить режимы работы испарителя, обеспечивающие как надежную фиксацию катодных пятен на рабочей поверхности, так и ускоренный выход катода в рабочий режим. На каждом этапе, в зависимости от условий существования разряда, определены режимы работы испарителя.

## Литература

1. Абрамов И. С., Быстров Ю. А., Лисенков А. А. и др. Вакуумно-дуговой источник плазмы. Патент РФ № 2072642 МКИ H05H1/50, C23C14/35 // БИ. № 3. 1997.
2. Ветров Н. З., Кузнецов В. Г., Лисенков А. А. и др. Вакуумно-дуговой источник плазмы. Патент РФ № 2180472 МКИ H05H1/50, C23C14/35 // БИ. № 7. 10.03.2002.
3. Барченко В. Т., Гончаров В. Д., Лисенков А. А. Вакуумно-дуговой разряд на интегрально-холодном катоде // Тр. III Междунар. Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 68–73.
4. Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988.