

# Системы сепарации в вакуумно-дуговых источниках плазмы

А.А. Лисенков<sup>1</sup>, В.Т. Барченко<sup>2</sup>, В.Д. Гончаров<sup>2</sup>, А.С. Жеухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиноведения РАН  
199178 Россия, Санкт-Петербург  
e-mail: ind@director.ipme.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина)  
197376 Россия, Санкт-Петербург  
e-mail: vtbarchenko@yandex.ru

Применение вакуумно-дуговых источников плазмы ограничено высокой плотностью плазменного потока и наличия в нем капельных образований. Предложены методы позволяющие расширить их практическое применение.

## Введение

В настоящее время вакуумно-дуговые источники плазмы с интегрально-холодным катодом являются одним из широко распространенных типов плазменных эмиссионных систем. Однако, в некоторых областях применение подобных плазменных систем ограничено из-за высокой плотности энергии, приносимой плазменным потоком на модифицируемую поверхность, а соответственно высокой температурой обрабатываемого изделия), и присутствия в потоке не только заряженных атомных частиц, но и заметного количества частиц материала катода в виде нейтральных и заряженных нанокластеров и капельных образований, имеющих поперечные размеры до нескольких микрон. Соотношение между компонентами зависит от материала катода, величины тока разряда и времени горения дуги [1].

## Тепловой режим обрабатываемого изделия

В плазменных технологиях, основанных на применении потоков металлической плазмы, формирование покрытий осуществляется за счет конденсации на поверхности ионов, обладающих высокой кинетической энергией. В этом случае обрабатываемая поверхность подвергается интенсивному тепловому воздействию. Следует отметить, что в ряде случаев высокая плотность теплового потока затрудняет или делает невозможным процесс обработки: например, перегрев диэлектрических или стеклянных подложек может привести к их механическому разрушению. Для изделий машиностроения на любой стадии обработки, температура подложки не должна превышать температуру рекристаллизационного отжига, находящуюся на уровне 500...800 К, а у инструментальных сталей она еще ниже [2]. Таким образом, тепловой режим обрабатываемой поверхности является одним из определяющих факторов при использовании вакуумно-дуговых источников плазмы.

Данное условие обязывает поддерживать определенную связь между предельно допустимой температурой образца и параметрами плазменного потока.

Количественно связь между допустимой температурой подложки  $T_{\max}$  и плотностью плазменного потока можно оценить исходя из следующих предположений:

– скорость роста наносимого покрытия  $\mathcal{Q}_p$  зависит от энергии частицы  $W_i$  и плотности ионного тока  $j_i(I_{\text{разр}}, L_{\text{кат-под}})$ , являющейся функцией разрядного тока  $I_{\text{разр}}$  и расстояния от катода до подложки  $L_{\text{кат-под}}$ , и определяется с учетом коэффициентов аккомодации  $\chi(W_i)$  и самораспыления  $k(W_i)$  следующим соотношением

$$\mathcal{Q}_p = j_i(I_{\text{разр}}, L_{\text{кат-под}})(\chi(W_i) - k(W_i)) / qn_0;$$

– толщина формируемого покрытия  $\delta$  определяется временем  $t$  воздействия потока на деталь  $\delta = t \vartheta_p$ ;

– мощность, выделяющаяся на образце, зависит от величины отрицательного смещения  $U_{см}$ , задаваемого на деталь,  $P_{выд} = j_i (I_{разр}, L_{кат-под}) U_{см}$ ; а вся мощность отводится за счет излучения  $P_{изл} = \sigma \varepsilon (T_{max}^4 - T_0^4)$  [3].

При использовании данных предположений, были получены оценочные выражения для определения допустимой скорости роста наносимого покрытия и концентрации плазмы у поверхности конденсации, при которых температура изделия не поднимается выше предельно допустимой:  $\vartheta_p = \frac{n_e}{\xi n_0} \vartheta_{эф} (\chi(W_i) - k(W_i))$ , откуда  $n_e \leq \sigma \varepsilon (T_{max}^4 - T_0^4) / e U_{см} \vartheta_{эф}$ , где

$T_{max}$  – максимально допустимая температура поверхности подложки;  $\vartheta_{эф} = 0.5 \vartheta_{is} + \vartheta_{пл} \cos \beta$  – эффективное значение скорости, определяющее ход процесса конденсации заряженных частиц и учитывающее ориентацию поверхности в потоке плазмы.

Приведенные выражения позволяют получить значение допустимой концентрации заряженных частиц и принять решение о необходимости в дальнейшем использовать дополнительные меры по управлению плотностью плазменного потока.

Высокая плотность плазменного потока и температура подложки в процессе формирования покрытия часто способствуют возникновению униполярных дуг с поверхностных загрязнений и микроскопических неоднородностей на рабочей поверхности с образованием катодных пятен. Развивающийся пробой связан с мгновенно увеличивающейся концентрацией ионов, повышением температуры, самопроизвольным ростом автоэлектронного тока и появлением термоэмиссионных центров.

Теоретический анализ процессов в пограничном слое осуществлялся с учетом [4]:

– ионов, эмитированных из плазмы:

$$j_{i1} = j_{iпл} \exp \left( \int_L^0 n_0 S_{\pi} (U_0 - U(z) + U_{is}) dz \right) = j_{iпл} F_1,$$

где  $S_{\pi} = S_0 \frac{Ry}{U_i} \ln^2 \left( 2.2 \cdot 10^8 / (2qU / m_i)^{1/2} \right)$  – сечение перезарядки ионов;

– ионов, образующихся в результате перезарядки:

$$j_{i2} = j_{iпл} \int_0^L n_0 S_{\pi} (U_0 - U(x) + U_{is}) \exp \left( \int_x^0 n_0 S_{\pi} (U_0 - U(y) + U_{is}) dy \right) dz = j_{iпл} F_2;$$

– ионов, образующихся в результате ионизации:

$$j_{i3} = j_{en} \int_0^L n_0 S_{\pi} (U_0 - U(x) + U_{is}) \exp \left( \int_0^L n_0 S_{\pi} (U_0 - U(z) + U_{is}) dz \right) dy = j_{en} F_3,$$

где  $S_i = 2.66 \cdot S_0 (Rd / U_i)^2 n \frac{(U / U_i) - 1}{(U / U_i)^2} \ln(1.25U / U_i)$  – сечение ионизации;  $n$  – число валент-

ных электронов на внешней оболочке;  $S_0$  – сечение атома;  $Rd$  – постоянная Ридберга;  $U_i$  – потенциал ионизации;  $U$  – потенциал характеризующий энергию заряженной частицы;  $L$  – протяженность пограничного слоя в систем поток плазмы – изделие;  $n_0$  – концентрация нейтральных атомов в пределах пограничного слоя;  $S_{\pi}$  – сечение перезарядки ионов в зависимости от вида ионов и их энергии;  $S_i$  – сечение ионизации нейтральных частиц электронами в зависимости от вида частиц и от энергии электронов;  $U_0$  – напряжение смещения на подложке;  $U(z)$ ,  $U(y)$  – потенциал в пределах пограничного слоя с координатами  $z$  и  $y$ ;  $z$ ,  $y$  – независимые координаты, отсчитываемые от поверхности изделия в сторону плазменного потока.

В рамках предложенной модели можно получить выражение для оценки электрической прочности системы в зависимости от параметров плазменного потока и от состояния обрабатываемой поверхности:

$$j_i = \frac{j_{i0}\beta(F_1 + F_2)}{1 - \beta\gamma_{ie}(F_3 - \gamma_{ei}F_1 - \gamma_{ei}F_2)},$$

где  $j_i$  – плотность ионного тока на поверхности изделия;  $j_{i0}$  – плотность ионного тока на пограничном слое плазма – изделие;  $\beta$  – коэффициент концентрации ионного тока на микроскопических неоднородностях;  $\gamma_{ie}$  – эффективное значение коэффициента вторичной эмиссии ионно-электронного типа поверхности изделия, учитывающее вклад термоэлектронной эмиссии с поверхности;  $\gamma_{ei}$  – коэффициент вторичной эмиссии электрон-ионного типа потока металлической плазмы.

Коэффициент вторичной эмиссии электронно-ионного типа для плазменного потока определяется следующим образом:

$$\gamma_{ei} = \mathfrak{G}_{\text{пл}} \left( \frac{1}{(2eU_0/m_e)^{1/2}} + \int_{z_i}^L \frac{n_0(z)S_i U(z) dz}{(2e(U_0 - U(z))/m_e)^{1/2}} \right),$$

где  $z$  координата пространства, при которой потенциал равен потенциалу ионизации нейтралов.

Пробой пограничного слоя может наблюдаться и при отсутствии ионизации над поверхностью, критерием в этом случае будет являться соотношение  $\gamma_{ei}\gamma_{ie} = 1$ .

Таким образом, при отработке технологического процесса формирования покрытий, с использованием вакуумного дугового разряда, необходимо согласовать технологические режимы напыления (параметры плазменного потока) с исходным состоянием обрабатываемой поверхности.

## Капельные образования

Наличие в плазменном потоке капельных образований существенно ограничивает возможность использования вакуумно-дуговых источников плазмы. Так при формировании покрытий капли являются источником возникновения локальных напряжений; снижения износостойкости; ухудшения микрорельефа; возникновения пористости в формируемой структуре, способствующей развитию проникающей коррозии.

Под действием давления плазмы  $p$  происходит деформация слоя жидкого металла, приводящая к движению жидкости в виде капель, попадающих в рабочий объем и на обрабатываемое изделие. Сила, действующая на катод, обусловлена, в основном, ионной составляющей плазменного потока.

Изучение с помощью электронного микроскопа продуктов эрозии материала катода, сконденсированных на поверхности коллекторов, показало, что частицы размером несколько микрометров и менее имеют полусферическую форму. Более крупные частицы имеют почти плоскую среднюю область, окруженную более высоким кольцом. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что до удара о поверхность конденсации частицы находились в жидком состоянии [5].

Количество регистрируемых частиц возрастает с уменьшением их диаметра, однако основные потери массы в капельной фазе происходят за счет частиц диаметром 10...40 мкм. В продуктах эрозии обнаруживались и более крупные частицы, а также осколки материала катода, имеющих неправильную форму. Максимальное количество капельных образований испаряется с рабочей поверхности катода под углом 20...30° к его поверхности и для формируемого потока наблюдается картина радиальной симметрии [6].

Известно, что за счет снижения разрядного тока дуги удается значительно сократить как общее количество капельных образований в потоке, так и их размеры. Однако с уменьшением тока дуги в 2.5 раза относительное содержание капельной фазы в конденсате

уменьшается лишь на 20...25 %, хотя общий объем расплываемого материала при этом снижается более чем в 5 раз. Таким образом, уменьшением тока можно получить лишь более тонкие покрытия и при этом не обеспечить поставленной задачи по достижению необходимого качества наносимого покрытия. При этом следует подчеркнуть, что если зависимость скорости осаждения покрытия от величины тока горения дуги имеет линейный характер, то постоянная кристаллической решетки и полуширина дифракционных максимумов изменяются нелинейно.

## **Очистка и управление плотностью плазменного потока**

Для исключения попадания нейтральных частиц и капельных образований на обрабатываемую поверхность применялись специальные плазмооптические системы транспортировки плазменного потока, аналогичные устройствам, применяемым в установках термоядерного синтеза для получения сгустков водородной плазмы высокой чистоты. В этом случае транспортировка плазмы осуществлялась в криволинейном магнитном поле тороидального соленоида. Движение замагниченной по электронам плазмы в криволинейном магнитном поле, из-за его неоднородности и появляющейся при этом центробежной силы, вызывает дрейф заряженных частиц перпендикулярно средней плоскости тора со скоростью  $\vartheta_0 = (m_i / q r_B) (\vartheta^2 / B)$ , где  $r_B$  – радиус кривизны магнитных силовых линий [7], [8].

Использование принципов плазмооптики позволяет, управлять структурой электрического поля и движением заряженной компоненты плазменного потока путем изменения конфигурации сопровождающего магнитного поля [9].

Очистка плазменного потока может осуществляться непосредственно и в рабочем объеме вакуумной камеры за счет отклонения заряженной компоненты на 90 или 180° [10], [11].

Во всех случаях заряженная компонента плазмы движется вдоль магнитных силовых линий и транспортируется к поверхности конденсации, расположенной вне зоны попадания капельных образований.

При использовании вакуумного дугового источника плазмы с индукцией магнитного поля в криволинейной системе транспортировки 0.22 Тл и заземленном аноде, коэффициент пропускания системы  $\eta = I_{i\text{вых}} / I_{i\text{вх}}$  не превышает 2...4 % ( $I_{i\text{вх}}$  и  $I_{i\text{вых}}$  – ионные токи насыщения на входе и выходе плазмоведа). Для обеспечения более эффективной транспортировки плазменного потока вдоль криволинейного плазмоведа необходимо обеспечить магнитное поле порядка 1 Тл [12], [13]. Создание таких стационарных полей вызывает определенные технические трудности, связанные с чрезмерным увеличением размеров установки и повышением требуемой для ее работы мощности источников питания, что, в конечном счете, снижает экономическую эффективность используемых систем.

**Необходимый тепловой режим** обрабатываемого изделия и условия, предотвращающие возникновение на нем катодных пятен, могут быть достигнуты за счет устройств, обеспечивающих управление плотностью плазменного потока.

Для ослабления плотности потока был разработан плазменный аттенюатор (рис. 1, а), состоящий из набора плоско-параллельных пластин шириной  $L$  и с расстоянием  $H$  между ними. Устройство располагается в рабочем объеме на пути плазменного потока и находится под плавающим потенциалом, что позволяет в процессе работы снизить на него тепловые воздействия [14].

Основным параметром, характеризующим прохождение заряженной компоненты плазменного потока, является плотность ионного тока. Коэффициент прозрачности системы определяется отношением ионного тока, измеренного за системой электродов  $I_i(L)$ , к току этих частиц на входе –  $I_i(L=0)$ :  $\eta = I_i(L) / I_i(L=0)$ .

Положительно заряженная компонента плазменного потока, двигаясь со скоростью порядка  $10^4$  м/с, обладает высокой проникающей способностью, за счет чего и обеспечивается возможность частичного ее прохождения сквозь объем плазменного аттенюатора, при

условии частичного осаждения на его стенках. Поэтому необходимо, чтобы геометрия системы электродов и параметры плазменного потока удовлетворяли следующему условию:  $L/\vartheta_{\text{III}} \geq H/2\vartheta_{\text{is}}$ , т. е. чтобы время достижения заряженными частицами боковых стенок аттенюатора, за счет наличия ионно-звуковой скорости  $\vartheta_{\text{is}} = (kT_e/m_i)^{1/2}$ , было меньше времени прохождения его объема.

Взаимодействие плазменного потока с системой электродов рассматривалось из условия баланса положительно заряженной компоненты:  $I_i(L) = I_i(L=0) - \int_S j_i(L) dS$ , где  $j_i(L)$  – плотность тока ионов, нейтрализующихся на поверхности электродной системы.

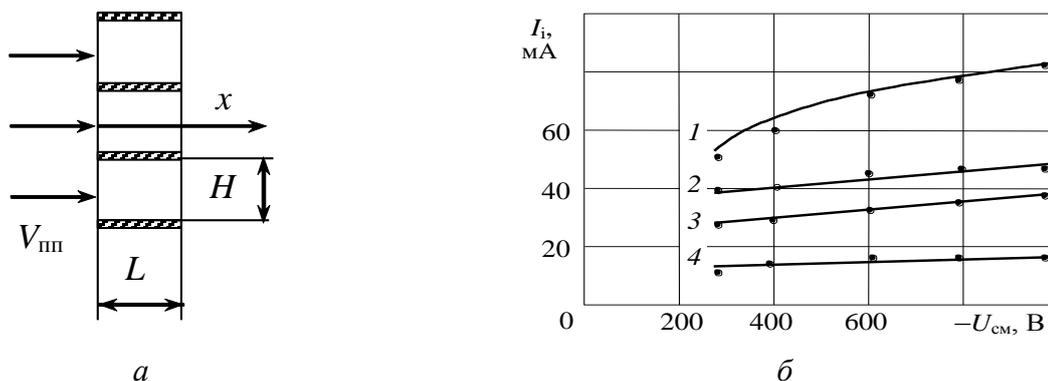


Рис. 1. Конструкция (а) и вольт-амперные характеристики (б), полученные в плазменном потоке при наличии и отсутствии плазменного аттенюатора: 1 – плазменный поток без аттенюатора; 2 – с аттенюатором  $L = 15$  мм,  $H = 5$  мм; 3 –  $L = 35$  мм,  $H = 10$  мм; 4 –  $L = 35$  мм,  $H = 5$  мм

За системой электродов скорость плазменного потока не изменяется, а изменяется только его плотность. Анализ записанных соотношений для коэффициента прозрачности электродной системы дает следующее решение:  $\eta = \exp(-\vartheta_{\text{is}}H/\vartheta_{\text{III}}L)$ .

Сопоставление экспериментальных данных, для систем с различной геометрией, и расчетных результатов свидетельствует о том, что предложенная математическая модель в целом удовлетворительно описывает взаимодействие потока плазмы с системой плоскопараллельных электродов, и позволяет с достоверной степенью точности определить коэффициент ослабления для ионной компоненты металлической плазмы, генерируемой вакуумным дуговым разрядом (рис. 1, б).

Таким образом, предложенное устройство позволяет при обработке изделий в достаточно широких пределах изменять плотность потока металлической плазмы.

На стадии финишной ионной очистки поверхности применение управляемого плазменного аттенюатора позволяет полностью исключить образование униполярных дуг, которые существенно снижают качество поверхности.

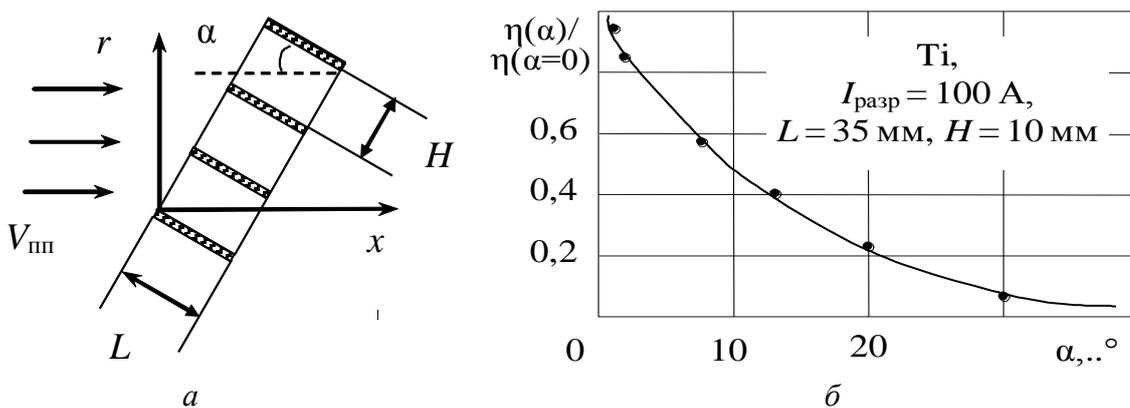


Рис. 2. Ориентация электродной системы в плазменном потоке (а)

При ориентации аттенюатора относительно плазменного потока под некоторым углом  $\alpha$  (рис. 2, а) удается добиться частичной очистки плазменного потока от капельной фракции. В этом случае для получения коэффициента прозрачности  $\eta_3$  исходили из следующих условий:

$$I_1(L) = I_1(L=0) - \int_S dI_1,$$

где  $dI_n = en_e(L)\vartheta_{\text{III}}H \operatorname{tg}\alpha dL$ ;  $dI_{i0} = 0.5en_e(L)\vartheta_{iS}HdL$ ;  $I_1(L=0) = en_e(L)\vartheta_{\text{III}}LH$ .

Данная система уравнений записана для малых углов  $\alpha$ . Результатом решения этой системы уравнений является:

$$n_e(L) = n_e(L=0) \exp[-(\operatorname{tg}\alpha + \vartheta_{iS}\vartheta_{\text{III}}^{-1})H/z],$$

где  $z = L \cos \alpha$ .

Отсюда для коэффициента прозрачности имеем

$$\eta = \exp[-(\operatorname{tg}\alpha + \vartheta_{iS}\vartheta_{\text{III}}^{-1})H/L \cos \alpha].$$

Полная очистка плазменного потока достигается при использовании сепаратора плазменного потока [15], состоящего из набора конических колец, ориентированных большим диаметром в сторону катода. Для повышения коэффициента прохождения плазменного потока и повышения скорости роста наносимого покрытия за подложкодержателем устанавливался дополнительный соленоид. Эффективность системы транспортировки заряженной компоненты плазменного потока в этом случае определяется согласованностью геометрии используемого сепаратора и пространственного распределения управляющего магнитного поля, создаваемого дополнительным магнитным источником.

## Выводы

На основе анализ взаимодействия ускоренных потоков металлической плазмы с поверхностью твердого тела показано, что при разработке технологического процесса формирования покрытий необходимо согласование технологического режима напыления и параметров плазменного потока с физическими свойствами и состоянием поверхности обрабатываемого изделия.

Использование плазменного аттенюатора позволило в широких пределах изменять плотность потока металлической плазмы и формировать дозированный плазменный поток, позволяющий согласовать тепловые режимы обрабатываемого изделия как в процессе ионной очистки, так и при формировании покрытия, при которых устраняется образование униполярных дуг на обрабатываемой поверхности, что позволяет повысить качество наносимого покрытия.

Разработанные электрофизические устройства для очистки плазменного потока от капельных образований по эффективности не уступают сложным плазмооптическим системам, приближая коэффициент прохождения плазменного потока к 45 %. Покрытия, формируемые с сепарацией плазменного потока, могут быть широко использованы в микроэлектронике, при обработке инструментальных и углеродистых сталей, а также при металлизации диэлектрических подложек.

## Список литературы

[1] Барченко В.Т., Быстров Ю.А., Колгин Е.А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. С.Пб.: Энергоатомиздат, 2001. 332с.

- [2] Лисенков А.А., Фролов В.Я. Вакуумно-дуговые устройства. Учебное пособие. – С.Пб.: Изд. Политехнического ун-та, 2008. 248с.
- [3] Абрамов И.С., Барченко В.Т., Лисенков А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 1994. № 3. С.121–131.
- [4] Добрецов Л.Н., Гомоюмов М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564с.
- [5] Daalder J.E. // IEEE trans. On power Appl. and Systems. 1974. № 6. P.1747–1758.
- [6] И.И. Аксенов, И.И. Коновалов, Е.Е. Кудрявцев и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 8. С.765–767.
- [7] Сафронов Б.Г., Войценья В.С., Коновалов И.И. // ЖТФ. 1962. Т. 32, № 6. С. 678–682.
- [8] Войценья В.С., Горбанюк А.Г., Онищенко И.Н. и др. // ЖТФ. 1967. Т. 37, № 2. С. 262–273.
- [9] Жуков В.В., Морозов А.И., Щепкин Г.Л. // Физика и применение плазменных ускорителей. – Минск: Наука и техника, 1974. – С.182–188.
- [10] Осипов В.А., Саблев П.П., Ступак Р.И. и др. // ПТЭ. 1978. № 6. С. 173–175.
- [11] Patent № 5279723 USA. C23C14/32. Filtered cathode arc source / S. Falabella, D.M. Sanders.
- [12] Аксенов И.И., Падалка В.Г., Остапов Н.С. и др. // Физика плазмы. 1980. № 2. С.312–317.
- [13] Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г. и др. // Физика плазмы. 1978. № 4. С.312–317.
- [14] Пат. на изобрет. 2058423 Российская Федерация, МПК 6С23С14/24. Вакуумно-дуговое устройство / Абрамов И.С., Быстров Ю.А., Лисенков А.А. и др.; опубл. 1996, Бюл. № 11.
- [15] Пат. на изобрет. 2039849 Российская Федерация, МПК С23С14/32. Вакуумно-дуговое устройство / Абрамов И.С., Быстров Ю.А., Лисенков А.А. и др.; опубл. 1995, Бюл. № 20.