

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ

И.И. Аксёнов, Д.С. Аксёнов, Ю.А. Заднепровский

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина*

Исследован усовершенствованный вакуумно-дуговой источник эрозионной плазмы с магнитным управлением катодным пятном и фокусировкой выходного плазменного потока. Установлена сильная зависимость интенсивности выходного плазменного потока и стабильности горения дуги в источнике от интенсивности и геометрии распределения магнитных полей в нём, а также от длины катода. В оптимальном режиме скорость осаждения титанового покрытия на расстоянии 55 мм от выходного торца источника достигает 80 мкм/ч в максимуме её радиального распределения при ширине последнего до 100 мм (на уровне полувысоты диаграммы распределения). Частота спонтанных погасаний разряда в оптимальных режимах работы источника не превышает 5 мин⁻¹.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумно-дуговой источник эрозионной плазмы – основной инструмент в технике вакуумно-дугового осаждения покрытий. К настоящему времени разработан ряд источников [1,2], предназначенных для решения различных технологических задач: от нанесения тонких и сверхтонких (толщиной 2...3 нм) износостойких, антифрикционных и оптических покрытий до выращивания толстых и сверхтолстых (до 1,5...2,0 мм) многослойных самонесущих структур. Широко применяются вакуумно-дуговые источники плазмы с магнитным управлением катодным пятном дугового разряда и с фокусировкой выходного плазменного потока [3,4]. Источники такого типа характеризуются достаточно высокой производительностью и возможностью управления интенсивностью плазменного потока. К недостаткам источника следует отнести большой продольный размер, большую материалоемкость и неудобство замены расходного катода, связанное с особенностями конструкции катодного узла.

Осаждение толстых и сверхтолстых слоёв конденсата осуществляется при длительной работе источника без остановки процесса и разгерметизации рабочей камеры для замены израсходованного катода. В этом случае неременным требованием к плазменному источнику является повышенный запас расходного плазмообразующего катодного материала, на основе которого формируется покрытие. Такому требованию отвечают источники с удлиненным цилиндрическим катодом [5]. В них предусмотрена возможность периодической подачи катода внутрь источника вдоль его оси по мере укорочения электрода вследствие эрозии его рабочего торца. Однако такая возможность смещения катода достигается ценой существенного усложнения конструкции источника. Как и в предыдущем варианте, в данной модели не решён вопрос удобства замены катода. Относительно большой продольный размер источника снижает

эргономические качества и дизайн установки в целом.

В работе [6] описана новая модель плазменного источника, в конструкцию которой заложены технические решения, обеспечившие существенное улучшение эксплуатационных качеств устройства и снижение его массогабаритных показателей. Настоящая работа посвящена исследованию рабочих характеристик нового источника плазмы.

2. УСТРОЙСТВО ИСТОЧНИКА; УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В конструкцию источника заложен принцип удержания катодного пятна (КП) на рабочей поверхности электрода магнитным полем с "пробкой" у тыльного торца катода [3,4]. В полости анода поле создаётся фокусирующими катушками. Коррекция поля, обеспечивающего стабильное горение дуги в источнике, осуществляется подбором величины и направления токов в фокусирующих катушках, а также применением ферромагнитного концентратора поля, помещённого с тыльной стороны катода.

Схема нового источника показана на рис. 1. Его катод *1* имеет форму усечённого конуса с основанием 80 мм и начальной высотой $h = 45$ мм. В качестве плазмообразующего металла использовался титан как достаточно изученный катодный материал, широко используемый в технике вакуумно-дугового осаждения покрытий. Коаксиально с катодом помещён анод *2*, изготовленный из немагнитной нержавеющей стали. Внутренний диаметр анода равен 160 мм, длина токоприёмной части анода *z* составляет около 120 мм (при высоте катода $h = 45$ мм). Стенки анода и тыльный торец катода – водоохлаждаемые (на рисунке не показано). Искровое поджигающее устройство бесконтактного типа расположено напротив боковой стенки катода у его основания. Устройство и принцип его действия описаны ранее в [7]. На рисунке это устройство условно обозначено цифрой *3*.

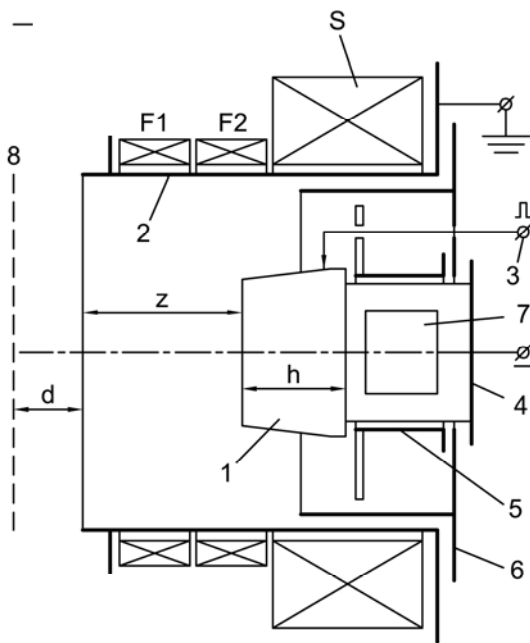


Рис. 1. Схема исследуемого источника плазмы

Катододержатель с элементами байонетного крепления катода, подвода охлаждающей воды к катоду и герметизации всех соединений на схеме обозначен цифрой 4. Цилиндрическая часть вспомогательного анода 5 экранирует боковые стенки катододержателя, а его торцевая часть в форме плоского кольца примыкает к основанию катода с зазором 1,5...2,0 мм. На вспомогательном аноде, который является также элементом поджигающего устройства, закреплена "свеча" этого устройства. Местоположение свечи обозначено стрелкой. Катодный узел, вспомогательный анод и поджигающее устройство закреплены на фланце 6. Новая конструкция катодного узла существенно упрощает процедуру замены катода и (совместно с укороченным анодом) обеспечивает возможность более чем вдвое сократить длину источника (256 мм) по сравнению с источником-прототипом (560 мм). На аноде размещены стабилизирующая катушка S и две фокусирующие катушки – F1 и F2. Стабилизирующая катушка содержит 2100 витков, фокусирующие катушки – по 380 витков каждая. Масса меди катушек на 30% меньше, чем в

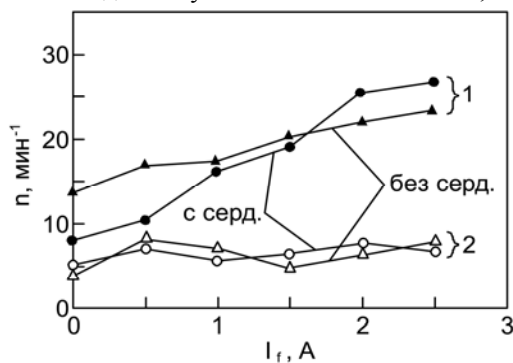


Рис. 2. Влияние тока в фокусирующих катушках (I_f) на частоту спонтанных погасаний дуги (n); $I_s = 1,4 A$, $I_d = 90 A$, $h = 45$ мм; $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Торр (1), $p = 2 \cdot 10^{-3}$ Торр (2)

источнике-прототипе. В полости катододержателя закреплён цилиндрический сердечник – концентратор магнитного поля 7, изготовленный из магнитной малоуглеродистой стали и служащий для коррекции магнитного поля вблизи боковой поверхности катода [8]. Штриховой линией 8 обозначено местоположение подложкодержателя.

Покрываются из титана наносились на плоские образцы из нержавеющей стали размером $20 \times 10 \times 2$ мм. Образцы размещались на плоском подложкодержателе на расстоянии d от выходного торца анода. Скорость осаждения покрытия определяли как толщину или массу конденсата, осаждённого за единицу времени (мкм/ч или мг/ч). Толщину покрытий измеряли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по высоте ступеньки между поверхностью покрытия и поверхностью подложки, закрываемой маской перед нанесением покрытия. Стабильность работы источника плазмы оценивалась по частоте спонтанного погасания дуги, эффективность поджига – по количеству пусковых импульсов, предшествующих зажиганию дугового разряда.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях высокого вакуума ($\sim 2 \cdot 10^{-5}$ Торр) относительно стабильная работа исследуемого источника плазмы имеет место в достаточно широких пределах изменения основных параметров, характеризующих режим работы источника: ток дуги (I_d) – от 80 до 160 А, ток в стабилизирующей катушке (I_s) – от 0,5 до 1,4 А, ток в фокусирующей катушке (I_f) – от 0 до 2,5 А.

Характер влияния тока дуги и тока в фокусирующих катушках на стабильность горения дуги в источнике иллюстрируют рис. 2 и 3. Приведенные зависимости типичны для вакуумно-дуговых источников плазмы с осесимметричными фокусирующими магнитными полями в анодной полости. Наиболее стабильна дуга в отсутствие магнитного поля катушек F1 и F2 ($I_f = 0$). Частота погасания разряда n при этом минимальна, поджиг наиболее облегчён – дуга зажигается практически с первого пускового импульса. Это обусловлено благоприятной геометрией магнитных полей в источнике (рис. 4,а): угол α пересечения магнитных

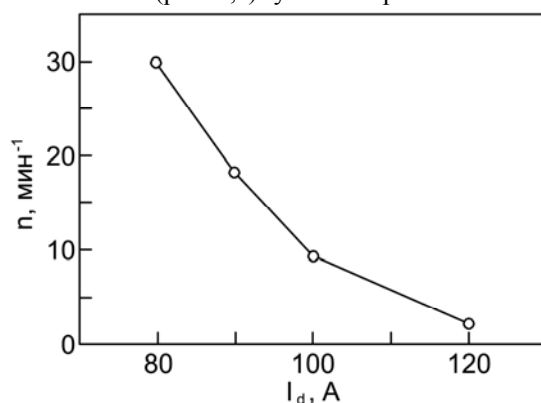


Рис. 3. Влияние тока дуги (I_d) на частоту спонтанных погасаний разряда (n); $I_s = 1,4 A$, $I_f = 1,5 A$, $h = 45$ мм, $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Торр

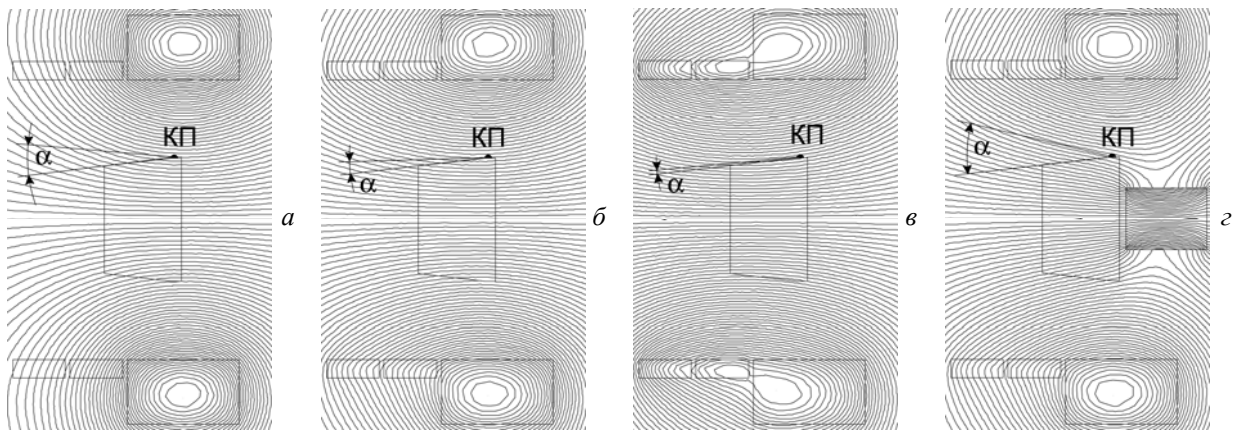


Рис. 4. Распределения магнитных полей в исследуемом источнике плазмы без ферромагнитного сердечника (а, б, в) и с сердечником (г); $I_s = 1,4$ А. $I_f = 0$ (а); $I_f = 1,5$ А (б, г); $I_f = 3$ А (в)

силовых линий с поверхностью катода в точке иницирования дуги достаточно велик [9] для спонтанного выбега пятна на боковую, нерабочую, поверхность катода. Тангенциальная к аноду составляющая магнитного поля, затрудняющая токоперенос между катодом и анодом, в рассматриваемом случае наименьшая, и, следовательно, условия горения дуги наиболее благоприятные. С усилением фокусирующего магнитного поля (см. рис. 4,б,в) угол α уменьшается, поперечная (по отношению к направлению электронного тока на анод) составляющая магнитного поля усиливается, и, следовательно, условия для эффективного зажигания и стабильного горения дуги ухудшаются. Этим объясняется рост частоты погасания дуги с усилением магнитного поля в аноде при увеличении тока I_f в фокусирующих катушках. При напуске азота плотность газовой среды в разрядном пространстве возрастает, условия замагниченности электронов нарушаются, проводимость плазмы поперёк поля (в направлении к аноду) повышается [2], что, в свою очередь, является причиной повышения стабильности горения дуги (см. рис. 2). К аналогичным последствиям ведёт увеличение разрядного тока I_d (см. рис. 3).

Созданию благоприятных для поджига условий (увеличению угла α) способствует наличие

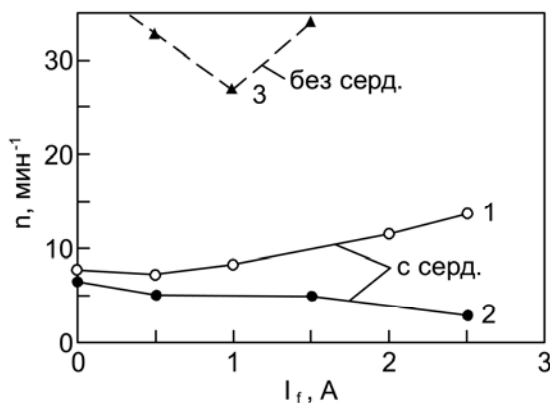


Рис. 5. Влияние тока в фокусирующей катушке (I_f) на частоту спонтанных погасаний дуги (n); $I_s = 1,4$ А, $I_d = 90$ А, $h = 20$ мм; $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Торр (1,3), $p = 2 \cdot 10^{-3}$ Торр (2)

обеспечения выброса КП в сторону рабочего торца катода как на стадии поджига, так и в случае ферромагнитного сердечника с тыльной стороны катода (см. рис. 4,г). Роль сердечника особенно ярко проявляется с уменьшением высоты катода h . Так, при $h = 20$ мм в отсутствие ферромагнитного сердечника добиться стабильной работы источника плазмы в условиях низких остаточных давлений ($p < 2 \cdot 10^{-5}$ Торр) оказалось невозможным, в то время как с сердечником источник работал достаточно стабильно как в вакууме, так и при напуске азота (рис. 5).

На рис. 6 приведены радиальные распределения скорости осаждения титанового конденсата, полученные на расстоянии $d = 115$ мм от анода в отсутствие тока в фокусирующих катушках ($I_f = 0$) и в условиях фокусировки плазменного потока ($I_f = 2,0$ А) при согласном включении всех катушек. Видно, что фокусировка в таких условиях ведёт к заметному сужению диаграммы направленности потока и увеличению скорости роста покрытия в максимуме распределения более чем вдвое. Рис. 7 иллюстрирует те же зависимости, что и на предыдущем рисунке, но полученные при $d = 55$ мм. Приведенные на рис. 6 и 7 данные свидетельствуют о сильной зависимости интенсивности выходного плазменного потока от положения поверхности конденсации относительно выходного среза анода.

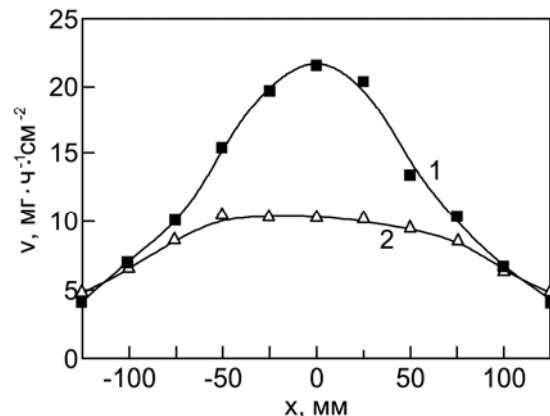


Рис. 6. Радиальное распределение скорости осаждения конденсата (v) на расстоянии 115 мм от анода; x – расстояние от оси источника в горизонтальном направлении; $I_f = 2$ А (1), $I_f = 0$ (2). Все катушки включены согласно $h = 45$ мм

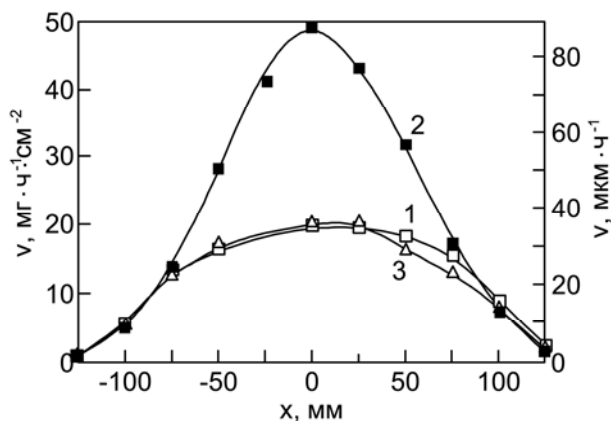


Рис. 7. Радиальное распределение скорости осаждения конденсата (v) на расстоянии 55 мм от анода; x – расстояние от оси источника в горизонтальном направлении; $I_s = 1,4$ А, $I_d = 90$ А; $I_f = 0$ (1); $I_f = 2$ А (2); $I_{f1} = 2$ А, $I_{f2} = -2$ А (3); $h = 45$ мм. I_{f1} и I_{f2} – токи в катушках F1 и F2 соответственно. Знак "-" означает встречное направление тока по отношению к току в стабилизирующей катушке

Смещение подложки вдоль оси системы в сторону катода всего на 60 мм (на 25% от исходного расстояния до катода) ведёт к повышению плотности плазменного потока, обеспечивающему двукратное увеличение скорости осаждения конденсата при той же форме её радиального распределения. Рис. 7 иллюстрирует также влияние направления тока в выходной фокусирующей катушке относительно тока в стабилизирующей катушке на форму радиального распределения скорости роста конденсата. Приведенные на этом рисунке кривые, а также данные работы [6] свидетельствуют о том, что встречное включение любой из двух фокусирующих катушек сводит почти к нулю их фокусирующее действие.

В связи с изложенным можно было ожидать также, что в случае удаления рабочего торца катода от выходного среза анода (например, в результате расходования катода в процессе работы источника) плотность плазменного потока на выходе и, следовательно, скорость осаждения конденсата на подложке будет снижаться. Действительно, как показали измерения (рис. 8), при уменьшении длины рабочей части катода до $h = 20$ мм, что соответствует увеличению расстояния между подложкой и торцом анода на 25 мм (по сравнению с условиями начала экспериментов, т.е. при $h = 45$ мм), скорость осаждения титанового покрытия снижается более чем вдвое. Такое, достаточно сильное, снижение скорости осаждения покрытий по мере расходования катода следует учитывать в практической работе с плазменным источником.

При необходимости это снижение может быть скомпенсировано соответствующей регулировкой магнитных полей в источнике и/или увеличением разрядного тока [2].

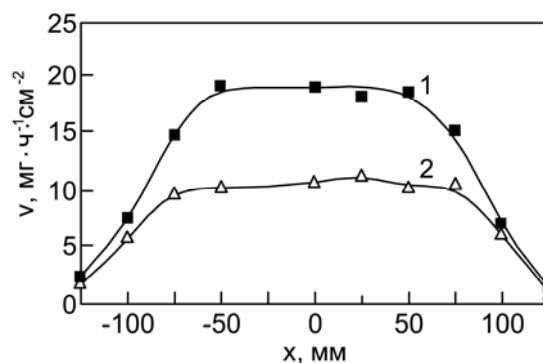


Рис. 8. Радиальное распределение скорости осаждения конденсата (v) при $d = 55$ мм. x – расстояние от оси по горизонтали. Все катушки включены согласно $h = 20$ мм, $I_s = 1,4$ А, $I_d = 90$ А. $I_f = 2$ А (1), $I_f = 0$ (2).

4. ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что интенсивность выходного плазменного потока и стабильность горения дуги в новом источнике сильно зависят от интенсивности и геометрии распределения магнитных полей в нём, а также от положения подложки относительно катода. По мере укорочения рабочей части катода в процессе его расходования повышается роль ферромагнитного концентратора в поддержании стабильности дугового разряда. В оптимальном режиме скорость осаждения титанового покрытия на подложку, размещённую на расстоянии 55 мм от анода, достигает 80 мкм/ч на оси системы при ширине радиального распределения скорости до 100 мм (на уровне полувысоты диаграммы распределения). Частота спонтанных погасаний разряда в оптимальных режимах работы источника не превышает 5 мин⁻¹. Равномерное по толщине покрытие при скорости его осаждения 10 мкм/ч и токе дуги 90 А достигается в пятне конденсата диаметром 150 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 236 с.
2. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 212 с.
3. I.I. Axenov, V.G. Bren, V.G. Padalka, L.P. Sablev, R.I. Stupak, V.M. Khoroshikh. *US Patent* N 4, 551, 221, Nov.5, 1985.
4. И.И. Аксёнов, В.Г. Падалка, В.Т. Толок, В.М. Хороших. Исследование движения потоков плазмы вакуумной дуги в линейной протяжённой плазмооптической системе // *Физика плазмы*. 1980, т. 6,4, с. 918 – 924.
5. I.I. Аксёнов, В.А. Білоус, Ю.О. Задніпровський, М.С. Ломіно, В.Д. Овчаренко. Вакуумно-дугове джерело плазми. *Пат. України №46887*, 17.06.2002.
6. D.S. Aksyonov I.I. Aksenov, Yu.A. Zadneprovsky, A.M. Loboda, S.I. Mel'nikov, V.M. Shulayev. *Vacuum-arc plasma source with controlled cathode spot*

motion // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008, т. 6/7 (36), с. 4 – 7.

7. И.И. Аксёнов, В.А. Белоус. Зажигание вакуумной дуги в стационарных источниках металлической плазмы от автономного плазменного инжектора // *ПТЭ*. 1979, №3, с.160 – 162.

8. А. с. СССР №1111671. Вакуумно-дуговое устройство / И.И. Аксёнов, В.Г. Брень,

В.Г. Падалка, В.М. Хороших, А.М. Чикрыжов. 1984 г., приоритет 5 июля 1982 г.

9. K.K. Zabello, Yu.A. Barinov, A.M. Chaly, A.A. Logatchev, S.M. Shkol'nik. Experimental Study of Cathode Spot Motion and Burning Voltage of Low-Current Vacuum Arc in Magnetic Field. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2005, v. 33, N 5, p. 1553 – 1559.

Статья поступила в редакцию 23.03.2009 г.

МАГНІТОКЕРОВАНЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЕ ДЖЕРЕЛО ПЛАЗМИ

І.І. Аксёнов, Д.С. Аксёнов, Ю.А. Задніпровський

Досліджено удосконалене вакуумно-дугове джерело ерозійної плазми з магнітним управлінням катодною плямою і фокусуванням вихідного плазмового потоку. Відзначено сильну залежність інтенсивності плазмового потоку й стабільності горіння дуги від напруженості й геометрії розподілу магнітних полів у джерелі, а також від довжини катода. В оптимальному режимі швидкість осадження титанового покриття на підкладку, розташовану на відстані 55 мм від анода, становить понад 80 мкм/г у максимумі її радіального розподілу при його ширині до 100 мм (на піввисоті діаграми розподілу). Частота спонтанних погасань розряду в оптимальних режимах роботи джерела не перевищує 5 хв⁻¹.

MAGNETICALLY OPERATED VACUUM-ARC PLASMA SOURCE

I.I. Aksenov, D.S. Aksyonov, Yu.A. Zadneprovskiy

The advanced vacuum-arc erosion plasma source with magnetically controlled cathode spot and focusing of a plasma stream is investigated. Strong dependence of intensity of the output plasma stream and the arc stability in a source on intensity and geometry of magnetic fields distribution in it, and also on the cathode length, is established. In an optimum mode the deposition rate of titanium coating at the distance from the source exit of 55 mm reaches 80 μm/h in the maximum of its radial distribution at width of the last 100 mm (at level of semiheight of the distribution diagram). Frequency of the arc spontaneous extinctions in optimum operating modes of a source does not exceed 5 min⁻¹.