

КАТОДЫ ИЗ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЛАЗМЫ

*Д.С. Аксёнов, И.И. Аксёнов, В.А. Белоус, Ю.А. Заднепровский, Н.С. Ломино,
В.Д. Овчаренко*

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

Приведены результаты исследования особенностей работы вакуумно-дугового источника плазмы с магнитным управлением катодным пятном дуги при использовании в качестве катодного материала ферромагнитных материалов (Ni, Fe). Путём подбора токов в стабилизирующей и фокусирующей катушках с применением корректирующих ферромагнитных вставок (концентраторов) найдены напряжённость и геометрия распределения магнитных полей, которые обеспечивают надёжный поджиг дугового разряда в источнике, стабильное горение катодного пятна на рабочем торце катода и равномерную эрозию последнего.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная дуга катодного типа широко используется в технологиях ионно-плазменного модифицирования поверхностей материалов и осаждения покрытий различного функционального назначения [1-3]. Технологические возможности вакуумно-дугового метода необычайно широки. С помощью дугового разряда в вакууме или в газовой среде низкого давления возможен перевод в плазменное состояние с последующей конденсацией практически всех металлов и их соединений, обладающих металлической электропроводностью. В зависимости от конкретных технологических задач в качестве источника эрозионной плазмы применяются дуги, горящие либо в режиме постоянного тока, либо в импульсном режиме. В условиях промышленного производства, когда производительность процесса имеет одно из определяющих значений, используются вакуумно-дуговые источники плазмы постоянного тока. Важнейшим показателем пригодности таких источников к применению в производственной практике является стабильность разряда и надёжность его поджига при максимально возможном коэффициенте полезного использования катодного (плазмообразующего) материала. К настоящему времени разработаны и широко применяются в производстве и в физических экспериментах источники с магнитной стабилизацией катодного пятна (КП) дуги на рабочей (эродирующей) поверхности катода и с надёжной системой поджига разряда. Однако в качестве катодных материалов в таких источниках могут быть использованы только немагнитные металлы, сплавы и композиционные материалы. Что же касается ферромагнетиков (железа, никеля, кобальта и сплавов на их основе), то их использование в качестве катодных материалов в источниках плазмы упомянутого типа крайне проблематично из-за неустойчивости разряда. В случае ферромагнетиков существующие системы магнитной стабилизации не обеспечивают удержание КП на рабочей поверхности катода, а при поджиге на его боковой поверхности в

"стандартных" условиях пятно практически невозможно вывести на рабочий торец электрода. Вместе с тем, применение уникальной вакуумно-дуговой технологии осаждения покрытий могло бы открыть возможности для синтеза новых композиционных материалов, содержащих ферромагнетики, и расширить сферу их применения в таких областях, как производство печатных плат, микроэлектроника, радиоэлектроника, производство устройств магнитной памяти, авиастроение, аэрокосмическая техника, атомная энергетика, автомобилестроение, химическая промышленность и ряд других отраслей машино- и приборостроения [4,5].

В задачу настоящей работы входило выяснение причин нестабильности вакуумной дуги на ферромагнитных катодах в плазменных источниках с магнитным управлением КП и использование полученных данных для устранения этих причин или, по крайней мере, минимизации их воздействия на поведение дуги.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на установке "Пента" (рис. 1) со стационарным плазменным источником от установки "Булат-6". Схематически источник плазмы изображён на рис. 2,а. В этом источнике катод (1) из расходоуемого плазмообразующего материала имеет форму усечённого конуса с основанием 60 мм и высотой 15...35 мм. В качестве катодных материалов использовались никель, сталь Ст.3 и титан, как достаточно изученный катодный материал, широко используемый в технике вакуумно-дугового осаждения покрытий. У основания катода размещён вспомогательный анод 2 в виде плоского кольца, охватывающего катод с зазором 1,5 мм. На электроде 2 закреплено поджигающее устройство, описанное ранее [6]. На рисунке это устройство условно обозначено стрелкой 3. Катод, вспомогательный анод, поджигающее устройство и относящиеся к ним элементы конструкции размещены в корпусе катодной камеры 4, на котором снаружи размещена стабилизирующая

катушка 5. К корпусу пристыкован цилиндрический анод 8 с фокусирующей катушкой 9. Внутренний диаметр анода равен 210 мм, длина токоприёмной поверхности (по образующей) – 200 мм. Стабилизирующая катушка имеет 3000 витков, фокусирующая – 3600 витков. Анод и катод охлаждаются проточной водой (не показано). Катодная камера и анод выполнены из немагнитной нержавеющей стали. Рабочая камера установки, фрагмент которой со стыковочной горловиной обозначены цифрой 10, выполнена из стали Ст.20.

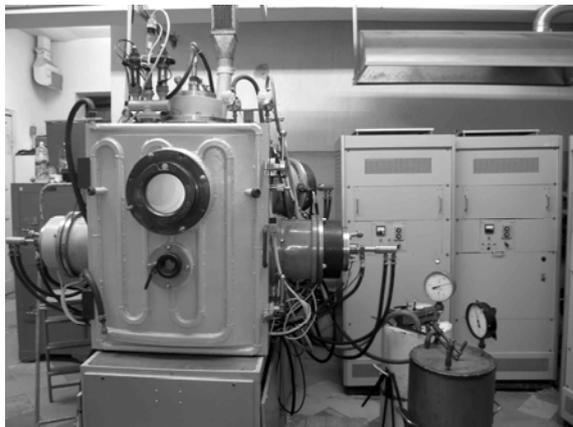


Рис. 1. Установка "Пента"

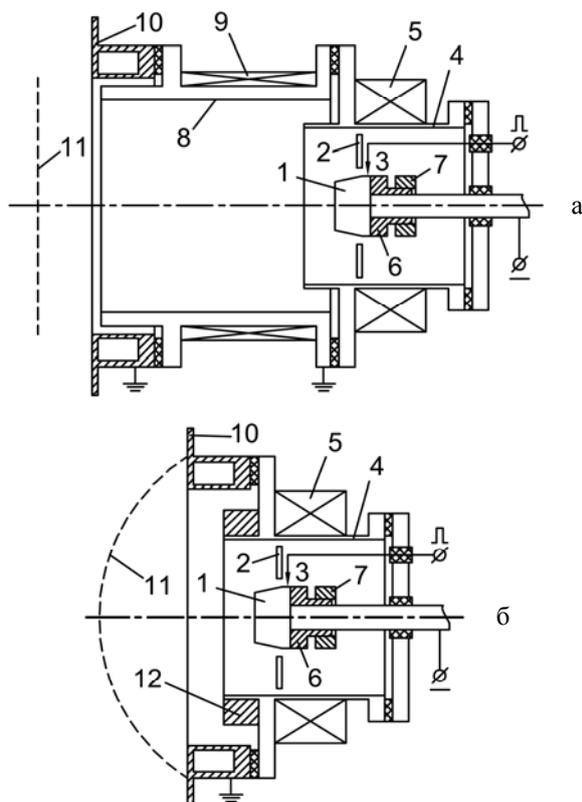


Рис. 2. Вакуумно-дуговой источник плазмы: с цилиндрическим анодом и фокусирующей катушкой (а) и с камерой-анодом (б)

На рис. 2,б показан вариант плазменного источника, в котором анод с катушкой отсутствуют, а функцию анода выполняет камера 10 установки.

Цифрами 6 и 7 на рисунке обозначены элементы съёмного магнитного концентратора из стали Ст. 3 [7]. В некоторых экспериментах на выходе катодной камеры устанавливался кольцевой магнитный концентратор 12 (см. рис. 2,б) [7].

Покрyтия из исследуемых материалов наносились на плоские образцы из нержавеющей стали размером 20×10×1,5 мм. Варианты месторасположения образцов относительно выхода плазменного источника на рис. 2 показаны штриховыми линиями 11. Толщину покрытий измеряли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по высоте ступеньки между поверхностью покрытия и поверхностью подложки, закрываемой маской перед нанесением покрытия. Скорость осаждения конденсата на образцы определялась весовым методом. Стабильность работы источника плазмы с катодом из исследуемого металла оценивалась по частоте спонтанного погасания дуги, эффективность поджига – по количеству пусковых импульсов, предшествующих зажиганию дугового разряда в источнике.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неустойчивость работы вакуумно-дуговых источников плазмы рассматриваемого типа с катодами из ферромагнетиков проявляется, прежде всего, в затруднённом поджиге разряда и кратковременности его существования в том случае, если акт поджига всё же завершается положительным результатом. При этом катодное пятно дугового разряда перемещается преимущественно вдоль кромки рабочего торца и по боковой поверхности катода. В связи с этим катод эродирует крайне неравномерно – выгорает периферийная часть торца и боковая поверхность электрода, а центральная часть торца остаётся нетронутой. Это, в свою очередь, обуславливает снижение интенсивности выходного потока плазмы (вдоль оси источника), поскольку максимум плотности потока, генерируемого катодным пятном, в данном случае направлен не по нормали к плоскости рабочего торца, а под некоторым углом к ней – по нормали к эродирующей (наклонной к торцу) поверхности электрода.

Особенности поведения катодного пятна в плазменном источнике с катодом из ферромагнитного материала можно объяснить, рассмотрев особенности топографии магнитных полей вблизи катода. Компьютерный расчёт магнитных полей показал, что в отличие от стандартных условий с катодом из диамагнитного материала (рис. 3,а,б), при высоких значениях магнитной проницаемости катодного материала у боковой поверхности катода, где размещено поджигающее устройство, формируется область минимума напряжённости магнитного поля, а магнитные силовые линии здесь наклонены в сторону токоподвода (см. рис. 3,в,г), обеспечивая благоприятные условия дрейфа КП в ту же сторону. Действительно, в исследуемых источниках с местом поджига, обозначенным стрелкой 3 (см. рис. 2), как

показывают наши эксперименты с катодами из никеля и железа, КП из точки инициирования сбрасывается в сторону, противоположную рабочему торцу – в зазор между токоподводом (катододержателем) и вспомогательным анодом. Здесь пятно гаснет. В худшем случае, при задержке его погасания, происходит повреждение системы поджига и катододержателя. Снизить вероятность "сброса" катодного пятна в опасном направлении можно, сместив место расположения поджигающего устройства с тыльной стороны вспомогательного анода на его "лицевую" сторону, т.е. туда, где магнитные линии наклонены в сторону рабочего торца катода. Фотография катодного узла с таким

нетрадиционным размещением поджигающего устройства приведена на рис. 4. Область с "опасным" направлением наклона линий магнитного поля может быть смещена с поверхности катода в сторону токоподвода, если со стороны тыльного торца катода разместить дополнительную ферромагнитную массу – концентратор магнитного поля [7]. В наших экспериментах это кольца из магнитной стали 6 и 7 (см. рис. 2). Картина распределения магнитных полей в источнике для случая использования только одного кольца 6 приведена на рис. 3, д, е, для варианта с обоими кольцами – на рис. 3, ж.

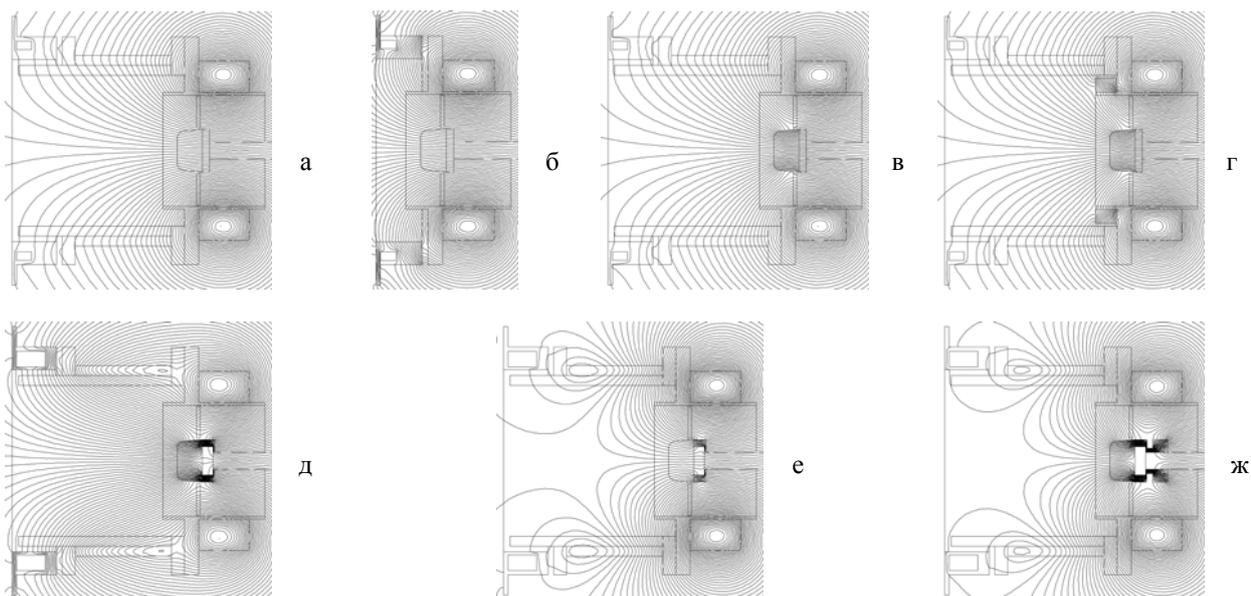


Рис. 3. Распределение магнитных полей (силовые линии) в исследуемом источнике плазмы: при согласном (а, в-д) и встречном (е, ж) включении магнитных катушек; в отсутствие (а-г) и при наличии (д-ж) катодного концентратора

Ферромагнитная масса катода, как видно из рис. 3, в-ж, искажает диаграмму распределения магнитных полей, ответственную за удержание КП на рабочей поверхности электрода, которая (диаграмма) рассчитана для случая немагнитных катодных материалов – титана, циркония, алюминия, ниобия, графита и др., широко используемых в технологии осаждения различных функциональных покрытий (см. рис. 3, а-б). Силовые линии поля в случае ферромагнетиков пересекают боковую поверхность катода под углом, близким к прямому, и, следовательно, действие поля, обеспечивающее дрейф КП в сторону катодного торца, минимизируется. Напомним, что катодное пятно вакуумной дуги, двигаясь в так называемом ретроградном направлении поперёк тангенциальной составляющей магнитного поля H_t со скоростью $v_r(H_t)$, одновременно дрейфует под углом Робсона θ к вектору ретроградного движения в сторону острого угла наклона φ силовых линий поля к поверхности катода в области КП. По нашим наблюдениям и по данным работы Юттнера, цитируемой в [8], угол θ максимален для

$\varphi = (40...60)^\circ$ и равен нулю для $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$. В области между торцевой и боковой поверхностями катода линии магнитного поля практически перпендикулярны поверхности этого электрода, поэтому здесь велика вероятность остановки пятна, фиксации его магнитным полем. В наших экспериментах это явление наблюдалось при токах I_s в стабилизирующей катушке свыше 1,4 А. Фиксация катодного пятна – крайне нежелательный режим: дуга при этом горит стабильно, анодный столб малоподвижен, и в неконтролируемых условиях, если не отключить питание разряда, может произойти интенсивная локальная эрозия обоих электродов с проплавлением сравнительно тонкой стенки анода. Следует отметить, что "привязка" КП к поверхности катода на кромке его торца в определённых условиях ($I_s > 1,4$ А, при напуске в рабочую камеру аргона даже при незначительном давлении порядка 10^{-4} Торр и увеличении тока дуги примерно до 120 А и более, при согласном включении стабилизирующей и фокусирующей катушек) характерна только для катодов из никеля и железа, применявшихся в

наших экспериментах. Что же касается катодов из немагнитных материалов, то в случае их использования в нашей прежней практике, как и в условиях данных экспериментов (Ti), фиксация катодных пятен не наблюдалась. Возможно, что причину такой разницы в поведении катодных пятен на сравниваемых материалах следует искать в том, что баланс факторов воздействия на КП со стороны внешнего и собственного магнитных полей дуги для ферромагнетиков отличен от соответствующего баланса для диамагнетиков.

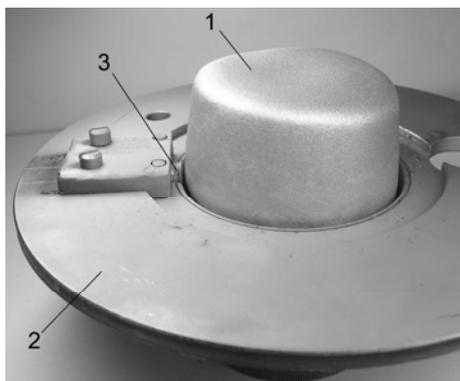


Рис. 4. Катодный узел: 1 – катод; 2 – вспомогательный анод; 3 – поджигающее устройство

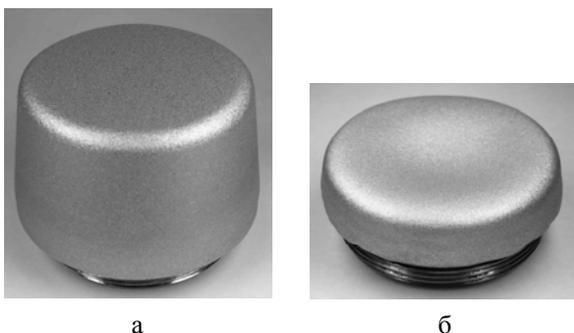


Рис. 5. Катод из никеля до (а) и после (б) испытаний

Показателем нестабильности дуги является также частота её спонтанных погасаний. При согласном включении катушек 5 и 9 (см. рис.2) в условиях вакуума порядка 10^{-5} Торр и токе дуги $I_0 = 90 \dots 100$ А этот показатель превышал 30 погасаний в минуту и сильно возрастал с уменьшением тока. При усилении магнитных полей, генерируемых катушкой 9 (I_f свыше 0,3 А), или с увеличением I_0 свыше 100 А дуга горела стабильно, однако КП перемещалось в основном по боковой поверхности катода. Таким образом, более или менее стабильное горение дуги с равномерным выгоранием торца катода при согласном включении катушек 5 и 9 возможно в достаточно узком диапазоне параметров. Стабильность дуги резко возрастала при встречном включении фокусирующей катушки относительно стабилизирующей. Вариант источника и распределение магнитных полей соответствовали рис.3,ж. При работе источника в варианте по рис. 2,б показатель нестабильности не превышал 20

погасаний в минуту. "Выгорание" катода в описанных случаях было достаточно равномерным (рис. 5).

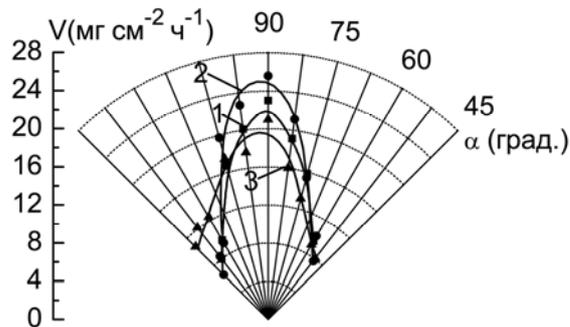


Рис. 6. Угловое распределение скорости осаждения Ni-конденсата на выходе источника (см. рис. 2,б) при высоте катода 15 мм (1,2) и 36 мм (3), с плоским торцом (1,3) и вогнутым на глубину 3 мм (2)

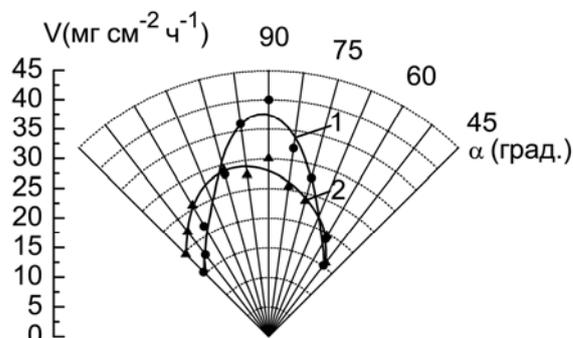


Рис. 7. Угловое распределение скорости осаждения Fe-конденсата на выходе источника (см. рис. 2,б) при наличии (1) и в отсутствие (2) катодного концентратора

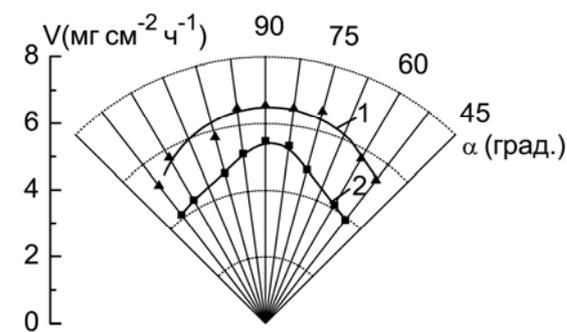


Рис. 8. Угловое распределение скорости осаждения Ni-конденсата на выходе источника по рис. 2,а при отключенной фокусирующей катушке (1) и при встречном её включении (2); $I_s = 1,25$ А, $I_f = 0,3$ А

Характерные диаграммы углового распределения скорости осаждения конденсата (и, следовательно, плотности плазменного потока) на выходе исследуемого источника с катодами из никеля и железа, полученные в различных условиях, приведены на рис. 6 – 8. Обращает на себя внимание достаточно заметное влияние на выходной плазменный поток таких факторов, как высота катода и форма его рабочего торца (см. рис. 6),

наличие или отсутствие магнитного концентратора со стороны тыльного торца катода (см. рис. 7). Измерения показали также, что в варианте источника по рис. 2,а, интенсивность выходного плазменного потока при отключенной фокусирующей катушке ($I_f = 0$) в несколько раз ниже, чем в случае источника по рис. 2,б с камерой-анодом (см. рис. 6, 8). Встречно подключенная фокусирующая катушка не улучшает ситуации, так как значительная часть потока, поступающего в анодную полость, уходит на стенки анода через магнитную щель между встречными полями. Такова плата за стабильность дуги, достигаемую встречным включением катушек.

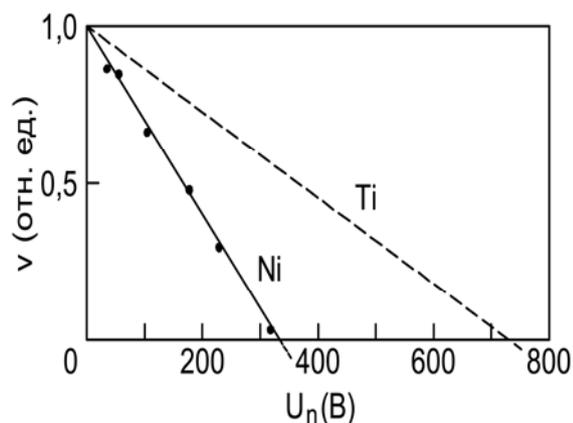


Рис. 9. Зависимость скорости роста конденсата V от величины отрицательного напряжения смещения на подложке U_n

На рис. 9 приведена кривая зависимости скорости осаждения никеля V в вакууме ($1,5 \cdot 10^{-5}$ Торр) от ускоряющего отрицательного напряжения смещения на подложке U_n . Также для сравнения приведена аналогичная кривая для титана, заимствованная из работы [9]. Из приведенного рисунка следует, что ионы никеля обладают высокой распыляющей способностью. В результате самораспыления рост никелевого конденсата прекращается уже при $U_n \approx 320$ В, в то время как для титана нулевая скорость осаждения наступает лишь при $U_n \approx 720$ В.

4. ВЫВОДЫ

Из приведенных в настоящей работе данных следует, что стабильная работа вакуумно-дуговых источников плазмы с катодом из ферромагнитных материалов (никеля и железа) обеспечивается путём коррекции магнитных полей в районе катода с помощью магнитных концентраторов. На практике в тех случаях, когда производительность процесса осаждения покрытий имеет определяющее значение, предпочтительнее использовать вариант источника с камерой-анодом.

Таким образом, можно считать, что результаты настоящей работы снимают ограничения на применение вакуумно-дугового разряда в важнейшей области формирования тонкоплёночных покрытий на основе ферромагнетиков.

Применение железа (сталей) в качестве катодного материала более дешёвого по сравнению с титаном, по мнению авторов работы [10], позволит более широко использовать вакуумную дугу в высокопроизводительных геттерных насосах, а также в качестве плазменного источника электронов в системах химико-термической обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 212 с.
2. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 236с.
3. В.Е. Стрельницкий, И.И. Аксёнов. *Плёнки алмазоподобного углерода*. Харьков: ИПП «Контраст», 2006, 344с.
4. С.К. Lee. Corrosion and wear-corrosion resistance properties of electroless Ni-P coatings on GFRP composite in wind turbine blades // *Surf. Coat. Technol.* 2008, v. 202, p.4868 – 4874.
5. В.Н. Хачин, В.Г. Пушкин, В.В. Кондратьев. *Никелид титана: структура и свойства*. М.: «Наука», 1992, 160с.
6. И.И. Аксёнов, В.А. Белоус. Зажигание вакуумной дуги... // *ПТЭ*. 1979, №3, с.160 – 162.
7. А. с. СССР № 1111671. *Вакуумно-дуговое устройство* / И.И. Аксёнов, В.Г. Брень, В.Г. Падалка, В.М. Хороших, А.М. Чикрыжов. 1984.
8. К.К. 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.
9. А.А. Андреев, И.В. Гаврилко, В.В. Кунченко, В.В. Локошко, Л.И. Сопрыкин. Исследование некоторых свойств конденсатов Ti-N₂, Zr-N₂, полученных осаждением плазменных потоков в вакууме (способ КИБ) // *ФизХОМ*. №3, с.64 – 67.
10. Л.П. Саблев, А.А. Андреев, Р.И. Ступак, В.М. Шулаев. Исследование сорбционной способности распыляемого железного геттера по азоту в электродуговом высоковакуумном насосе // *Proc. 4th Int. Symp. "Vacuum Technologies and Equipment"*. Kharkov, Ukraine, 2001, p.121 – 123.

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.

КАТОДИ З ФЕРОМАГНЕТИКІВ У ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДЖЕРЕЛАХ ПЛАЗМИ

Д.С. Аксьонов, І.І. Аксьонов, В.А. Білоус, Ю.А. Задніпровський, М.С. Ломіно, В.Д. Овчаренко

Наведено результати досліджень особливостей роботи вакуумно-дугового джерела плазми з магнітним управлінням катодною плямою дуги при використанні феромагнетиків (Ni, Fe) в якості катодних матеріалів. Шляхом підбору струмів в стабілізуючій і фокусуєчій котушках з використанням коректуючих феромагнітних уставок (концентраторів) виявлено напруженість і геометрію розподілу магнітних полів, які забезпечують надійний підпал дугового розряду в джерелі, стабільне горіння катодної плями на робочому торці катода й рівномірну його ерозію.

FERROMAGNETIC CATHODES IN VAKUUM-ARC PLASMA SOURCES

D.S. Aksyonov, I.I. Aksenov, V.A. Belous, Yu.A. Zadneprovsky, N.S. Lomino, V.D. Ovcharenko

Results of research of operational features of a vacuum-arc plasma source with magnetically controlled cathode spot motion are submitted. Ferromagnetics (Ni, Fe) were used as cathode materials in plasma source investigated. Strength and geometry of magnetic fields distribution ensuring reliable ignition of the arc in the source, a stable burning of the cathode spot at the cathode working surface, and also its uniform erosion have been found by fitting of currents in the stabilizing and focusing coils and using the correcting ferromagnetic cores (concentrators).