

## ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ СЕПАРАТОР УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

*И. И. Аксенов, В. А. Белоус, В. В. Васильев, Ю. Я. Волков, В. Е. Стрельницкий*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*  
*г. Харьков, Украина*

Проведено дослідження роботи прямолінійного сепаратора вуглецевої плазми вакуумної дуги. Показано, що ефективність роботи прямолінійного сепаратора залежить від форми катода, використовуваного в джерелі плазми. Розмір іонного струму на виході сепаратора складає 1,4 А - для стандартного катода і 1,7 А - для профілюваного катода при струмі дуги 130 А. Швидкість росту однорідного по товщині титанового й алмазоподібного вуглецевого покриттів склала 4,8 і 3 мкм/годину, відповідно на діаметрі 18 см при використанні профілюваного катода. Дані результати по величині іонного струму в чотири рази, а по діаметру рівнотовщинного покриття на порядок величини перевищують результати, отримані раніше для криволінійного сепаратора.

Проведены исследования работы прямолинейного сепаратора углеродной плазмы вакуумной дуги. Показано, что эффективность работы прямолинейного сепаратора зависит от формы катода, используемого в источнике плазмы. Величина ионного тока на выходе сепаратора составляет 1,4 А - для стандартного катода и 1,7 А - для профилированного катода при токе дуги 130 А. Скорость роста однородного по толщине титанового и алмазоподобного углеродного покрытий составила 4,8 и 3 мкм/ч, соответственно, на диаметре 18 см при использовании профилированного катода. Данные результаты по величине ионного тока в четыре раза, а по диаметру равнотолщинного покрытия на порядок величины превосходят результаты, полученные ранее для криволинейного сепаратора.

The researches of the rectilinear filter of a vacuum arc carbon plasma were carried out. It was shown that the effectiveness of the rectilinear filter depends on the cathode shape used in a plasma source. The value of an ion current at the filter output makes 1,4 A - for the standard cathode and 1,7 A - for the profiled cathode at the arc current of 130 A. The growth rate of the uniform thickness titanium and diamond-like carbon coatings has made 4,8 and 3  $\mu$  m/h, accordingly, on a diameter of 18 cm under using of the profile cathode. The given results on the ion current value in twice, and on a diameter of the uniform thickness coating on the order of value surpass results received earlier for curvilinear filter.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных методов синтеза алмазоподобных пленок углерода (АПУ) является метод, основанный на применении вакуумно-дугового разряда с графитовым катодом [1-2]. Именно такой метод обеспечивает возможность получения АПУ с рекордными характеристиками, приближающимися к характеристикам природного алмаза [3-6]. Однако в связи с тем, что используемые для синтеза потоки углеродной плазмы, генерируемые дуговым разрядом с катодным пятном на графите, содержат значительное количество макрочастиц этого материала, источники плазмы, работающие в режиме постоянного тока, должны быть оснащены устройствами для сепарации плазменных потоков. За последние два десятилетия разработаны различные методы подавления «капельной» составляющей плазменных потоков [4,7-10]. Из них метод, основанный на разделении траекторий ионных и капельных потоков в криволинейной транспортирующей системе со скрещенными электрическим и магнитным полями, обеспечивает наиболее полную очистку плазмы [4]. Однако это качество криволинейного сепаратора обеспечивается ценой больших

узкого плазмоведа. Кроме того, плазменный поток на выходе устройства достаточно узок и неоднороден по плотности, так что площадь покрытия с более или менее равномерным распределением толщины составляет всего несколько квадратных сантиметров. Вместе с тем, криволинейные сепараторы громоздки и сложны в изготовлении, что заметно удорожает технологическое оборудование. Все это, несмотря на высокое качество получаемых с помощью таких сепараторов покрытий, ограничивает практическое применение этих устройств лишь теми редкими случаями, когда ни производительность, ни стоимость оборудования не имеют решающего значения.

В связи с выше изложенным представляется целесообразным решить проблему повышения эффективности формирования сепарированных потоков углеродной плазмы путем совершенствования заведомо более простого технического решения, каковым является предложенный ранее так называемый, прямолинейный сепаратор [11].

Однако описанный в литературе прямолинейный сепаратор не пригоден для нанесения углеродных покрытий, так как при использовании графитового катода данный сепаратор выходит из строя из-за проплавления волоохлаждаемой стенки анода вслед-

ствии медленного перемещения катодного, а следовательно, и анодного пятна дуги.

Целью данной работы является исследование разработанного нами прямолинейного сепаратора для очистки углеродной плазмы вакуумно-дугового разряда.

## 2. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработанный вариант прямолинейного сепаратора для осаждения АПП содержит заслонку, выполненную из тугоплавкого материала (графита) в виде круга диаметром большим, чем диаметр распыляемого катода, а также систему графитовых колец с отверстиями конической формы, расположенных вдоль оси прямолинейного плазмоведа. Использование заслонок и системы колец-ловушек, выполненных из тугоплавкого материала, обеспечивает в отличие от [11] надежную защиту анода от проплавления анодным пятном дуги.

Схематическое изображение электродугового источника углеродной плазмы с прямолинейным сепаратором показано на рис. 1.

Проведены измерения максимального ионного тока на выходе сепаратора, распределения по радиусу подложки максимальной плотности ионного тока насыщения и толщины осаждаемого покрытия по радиусу подложки в зависимости от расстояния между подложкой и выходным срезом плазмоведа.

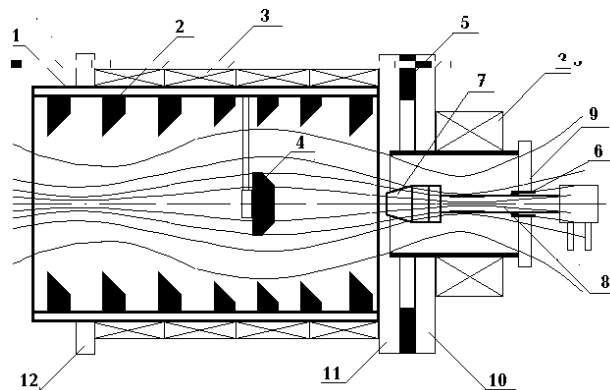


Рис. 1. Схематическое изображение электродугового источника плазмы с прямолинейным сепаратором: 1 - анод; 2 - графитовое кольцо; 3 - электромагнитная катушка; 4 - заслонка;

5 и 6 - изоляторы; 7 - графитовый катод; 8 - катододержатель; 9 - пристыковочные фланцы.

Распределение максимума ионного тока насыщения по радиусу подложки измерялось с помощью плоского одиночного электрического зонда, на который подавался потенциал  $-100$  В.

Максимальный ионный ток на выходе сепаратора измерялся с помощью плоского коллектора, перекрывающего все сечение сепаратора.

Толщина наносимых покрытий измерялась с по-

мощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по ступеньке, организуемой в покрытии с помощью локального экрана из суспензии микропорошка графита-аквадага.

Максимальный ток на подложку устанавливался путем подбора экспериментальным путем соотношения токов в соленоидах сепаратора и источника плазмы, обеспечивающих оптимальную конфигурацию магнитного поля плазмооптической системы.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения максимального выхода полного ионного тока насыщения на коллектор, полностью перекрывающего выходное отверстие сепаратора, показали, что при токе дуги  $130$  А максимальная величина выходного ионного тока составляла  $1,4$  А.

При работе с графитовым катодом было замечено, что почти  $50\%$  времени работы источника плазмы дуга горела на заслонку, находящуюся под потенциалом анода. При этом полный ионный ток на выходе сепаратора был близок к  $0$ . Это связано с тем, что при нахождении катодного пятна дуги в центральной области торцевой поверхности катода силовые линии магнитного поля, проходящие через эту область, одновременно пересекают заслонку. Вследствие этого дуге в этом случае выгодно гореть только на заслонку. Когда катодное пятно дуги случайным образом выходит из этой области, дуга начинает гореть на кольца сепаратора, и плазма вдоль силовых линий магнитного поля (ввиду замагниченности электронов) огибает заслонку и движется на выход сепаратора. В этом случае ионный ток насыщения на коллектор, установленный напротив сепаратора, имеет максимальную величину. Из-за малой скорости перемещения катодного пятна на графитовом катode ( $2...3$  см/мин), выполнить измерения распределения по радиусу подложки ионного тока насыщения не представляется возможным. Поэтому для облегчения процесса измерения данных параметров и получения более достоверных экспериментальных результатов по прохождению плазменных потоков через прямолинейный сепаратор вместо графитового катода был использован металлический (титановый) катод, на котором скорость движения катодного пятна на два порядка величины превосходит скорость движения пятна на графитовом катode. Ниже приведены радиальные распределения ионных токов насыщения, полученные с использованием титанового катода.

Замена графитового катода на титановый не привела к заметному изменению максимальной величины ионного тока насыщения. Однако из-за быстрого перемещения катодного пятна по поверхности катода частота колебаний ионного тока от  $I_i=0$  до  $I_i=I_{i\text{ MAX}}$  резко увеличилась. Это позволило значительно быстрее и точнее проводить измерение максимальных величин ионного тока насыщения, что особенно важно для проведения зондовых измерений.

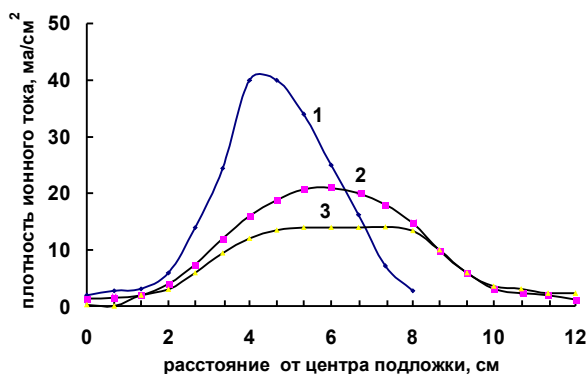


Рис. 2. Радиальное распределение плотности ионного тока для стандартного катода:  
1-Z=3 см; 2-Z=6 см; 3-Z=9 см

На рис.2 представлены радиальные профили максимальных плотностей ионного тока насыщения на различных расстояниях Z от торца сепаратора для стандартного катода из титана.

Как видно из рисунка, данные профили имеют провал в центре. С увеличением расстояния от торца сепаратора профиль ионного тока расплывается. Однако провал максимальной плотности ионного тока в центральной области подложки остаётся близким к 100% и изменяется в пределах от 90 до 95%, а относительная амплитуда колебаний ионного тока составляла величину, равную 100%.

Как было уже сказано выше, испытание работы сепаратора с источником углеродной плазмы показало, что значительную часть времени ~50% источник плазмы работает вхолостую. Т.е. на выходе сепаратора в течение этого периода времени нет потоков плазмы на подложку.

Для устранения этого недостатка был предложен профилированный катод, который отличается от стандартного конической выемкой в центральной его части. Силовые линии магнитного поля, пересекающие коническую поверхность выемки, образуют острый угол с образующей конуса. Это создаёт условия выталкивания катодного пятна дуги на торцевую часть катода, если оно случайным образом попадёт на коническую поверхность выемки. Поэтому катодное пятно дуги большую часть времени будет перемещаться по наружной части торцевой поверхности катода, имеющей форму кольца.

На рис.3 и 4 представлены радиальные распределения плотностей ионных токов и их флуктуаций соответственно на различных расстояниях Z от торца сепаратора для профилированного катода из титана. Из этих рисунков видно, что предложенная форма катода существенно улучшила однородность радиальных профилей плотности ионного тока на подложку и существенно уменьшила флуктуации ионных токов. Последний факт говорит о том, что только незначительная часть плазмы, обходящей заслонку, попадает на неё. Судя по измеренным флуктуациям ионного тока насыщения на выходе сепаратора (см.рис.4), эта часть составляет от 4 до 16% в зависимости от расстояний от центра

подложки и от торца сепаратора, на которых эти токи измеряются.

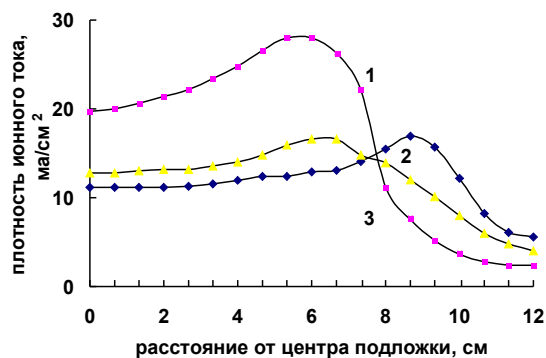


Рис. 3. Радиальное распределение плотности ионного тока для профилированного катода: 1-Z=3 см; 2-Z=6 см; 3-Z=9 см

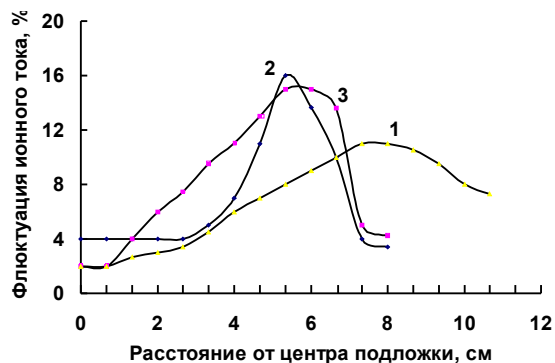


Рис. 4. Радиальное распределение плотности ионного тока для профилированного катода из Ti: 1-Z=3 см; 2-Z=6 см; 3-Z=9 см

Измерения максимального выхода полного ионного тока насыщения на коллектор, полностью перекрывающий выходное отверстие сепаратора, показал и что при токе дуги 130 А максимальная величина выходного ионного тока для профилированного катода составила величину 1,7 А. Это на 21% больше, чем для обычного катода при том же токе дуги.

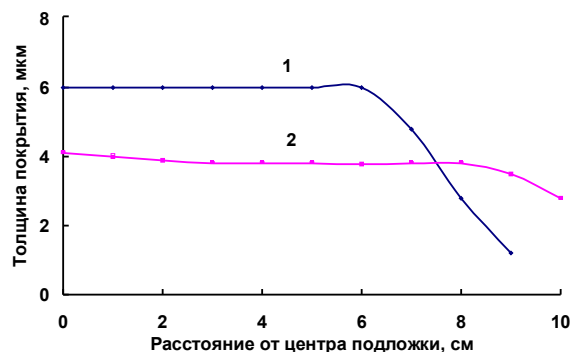


Рис. 5. Радиальное распределение плотности ионного тока для стандартного катода из Ti: 1-Z=6 см; 2-Z=9 см

На рис.5 представлены радиальные распределения толщины титанового покрытия на различных

расстояниях  $Z$  от торца сепаратора для стандартного катода. Осаждение покрытий проводилось в течение одного часа. Из рисунка видно, что несмотря на сильно неоднородные радиальные профили максимальных плотностей ионных токов на подложку (см. рис. 3), профили толщины покрытий являются довольно однородными на диаметрах 120 и 160 мм для  $Z=60$  и  $Z=90$  мм соответственно. Это говорит о том, что усредненные по времени значения плотностей ионных токов насыщения на вышеуказанных диаметрах также должны быть равными.

На рис.6 представлены радиальные распределения толщины титановых покрытий, полученных на различных расстояниях  $Z$  от торца сепаратора для профилированного катода. Время осаждения покрытий было такое же, как и для покрытий, полученных при использовании обычного катода (см. рис.5). Из рис. 5 и 6 видно, что скорость осаждения покрытий для случая профилированного катода на 20% выше, чем для обычного. Это соответствует увеличению максимума полного ионного тока насыщения на коллектор для профилированного катода по сравнению с непрофилированным.

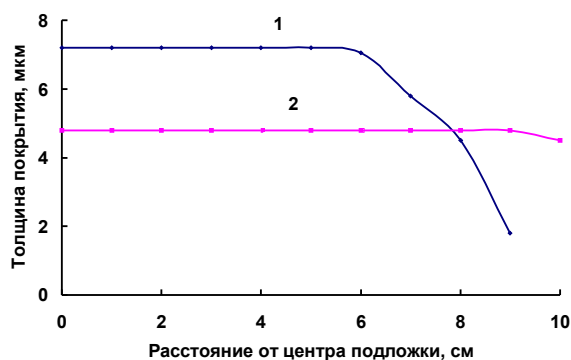


Рис. 6. Радиальное распределение толщины титанового покрытия для стандартного катода из Ti: 1- $Z=6$  см; 2- $Z=9$  см

Из этих рисунков также видно, что форма катода не влияет на однородность получаемых покрытий.

Для исследуемого типа прямолинейного сепаратора были получены однородные покрытия на диаметре  $D=12$  см при расстоянии подложки  $Z$  от торца сепаратора равном  $Z=6$  см и  $D=18$  см при расположении подложки от торца сепаратора равном  $Z=9$  см.

Проведены осаждения АПП с использованием профилированного графитового катода на охлаждаемую подложку. Скорость осаждения АПП на расстоянии 9 см от торца сепаратора составила 3 мкм/ч, неоднородность по толщине АПП составляла  $\pm 5\%$ . Средняя высота микровыступов на поверхности покрытия толщиной 1 мкм, характеризующая

эффективность очистки эрозионной плазмы от макрочастиц, составила  $\approx 0,1$  мкм.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование работы прямолинейного сепаратора для нанесения алмазоподобных углеродных покрытий показало, что эффективность его работы зависит от формы используемого катода в электродуговом источнике плазмы.

Экспериментально показано, что использование профилированного катода позволяет увеличить эффективность работы сепаратора не менее чем на 20% по сравнению с использованием катода обычной формы. Скорость роста однородного по толщине покрытия, полученная при работе источника с профилированным катодом, составила 3 мкм/ч на диаметре 18 см. Данные результаты по величине ионного тока в четыре раза, а по диаметру достигаемой равнотолщинности покрытия на порядок величины превосходят результаты, полученные ранее для криволинейного сепаратора. В этой связи создание прямолинейных фильтрующих систем описанного типа можно рассматривать как заметный шаг к расширению области практического применения вакуумно-дугового метода осаждения высококачественных алмазоподобных углеродных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Бакай, В. Е. Стрельницкий. Структурные и физические свойства углеродных конденсатов, полученных осаждением потоков быстрых частиц: Обзор. М.: ЦНИИатоминформ, 1984, 87 с.
2. D. M. Sanders, D. B. Boercer, S. Falabela, Coating technology based on the vacuum arc—a review.—// *IEEE transactions on plasma science*, 1990, v. 18(6), p. 883-894.
3. В. Е. Стрельницкий, В. Г. Падалка, С. И. Вакула// *ЖТФ*. 1978, т. 48 (2), с. 377.
4. И. И. Аксёнов, С. И. Вакула, В. Г. Падалка и др.// *ЖТФ*. 1980, т. 50 (9), с. 2000.
5. I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij // *Surface and Coatings Technology*. 1991 v. 47 (1-3), p. 98.
6. I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij // *Surface and Coatings Technology*. v.47 (13), p. 252.
7. S. Falabela, D. M. Sanders: US Patent 5279723, Jan.1994.
8. D. M. Sanders, S. Falabela: US Patent 5282944, Feb. 1994.
9. Shi Xu, B. K. Tay, H. S. Tan, Li Zhong, Y. Q. Tu and et. al. // *J. Appl. Phys.* 1996, v. 79 (9), p. 7234.
10. T. Schulke, A. Anders, P. Siemroth // *IEEE Transactions on plasma science*. 1997, v. 25 (4), p. 660.
11. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka, V. M. Khoroshikh: US Patent №4551221, Nov. 1985.