

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.793

ТРАНСПОРТИРОВКА ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

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

Экспериментально исследована транспортировка вакуумно-дуговой плазмы в цилиндрическом плазмодоме с аксиально симметричным неоднородным магнитным полем. Проанализировано влияние неоднородности продольного магнитного поля на процессы создания и транспортировки вакуумно-дуговой плазмы. Показано, что влияние «магнитного зеркала» с отношением $V_{\max}/V_{\min} < 2$, где V_{\min} – величина магнитного поля в аноде вакуумно-дугового источника (фокусирующее поле) и V_{\max} – величина магнитного поля в плазмодоме (транспортирующее поле), на прохождение плазмы из источника в плазмодом не существенно. Полученные результаты использованы для оптимизации процесса нанесения сверхтвердых покрытий из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы; приведены некоторые характеристики полученных покрытий.

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумно-дуговые источники плазмы широко применяются в различных процессах модификации поверхности и нанесения функциональных и декоративных покрытий [1].

Для получения высококачественных покрытий плазменный поток, генерируемый вакуумно-дуговым источником, пропускают через фильтр, в котором происходит очистка плазмы от макрочастиц материала катода. В настоящее время с этой целью наиболее часто используют магнитные фильтры [2]. В этом случае плазменный поток транспортируется вдоль криволинейного плазмодома с продольным (транспортирующим) магнитным полем. Считается, что наиболее благоприятной с точки зрения эффективности прохождения плазмы вдоль плазмодугового тракта источника с фильтром является структура магнитных полей с минимальными перепадами их интенсивности. Причем для надежного удержания катодного пятна на рабочем торце катода желательно, чтобы поле со стороны тыльного торца этого электрода было сильнее, чем со стороны анода [3]. В то же время наиболее благоприятные условия вхождения плазмы в магнитное поле транспортирующего канала фильтра достигаются в том случае, когда на входе в фильтр нет магнитной пробки (зеркала). В противном случае по мере увеличения отношения величины магнитного поля в плазмодоме к величине магнитного поля внутри анода источника растут потери плазмы вследствие отражения части плазменного потока от этой пробки (зеркала). Индукция магнитного поля в транспортирующем канале обычно составляет 5...30 мТ. Фокусировка плазмы в анодной области источника достаточно эффективна уже при полях, соответствующих нижней границе этого диапазона,

и обеспечивает значительное увеличение ионного тока на выходе цилиндрического анода [3], однако с усилением фокусирующего поля внутри анода до указанного уровня стабильность дугового разряда в источнике снижается. Зачастую источник теряет управляемость прежде, чем магнитное поле достигнет величины, обеспечивающей максимальный выходной поток ионов. Что же касается дальнейшего повышения магнитного поля в трубчатом аноде источника, необходимого для удовлетворительного согласования с полем фильтра, то горение дуги постоянного тока в таких условиях практически невозможно. В реальных условиях для обеспечения стабильной работы источника приходится уменьшать магнитное поле в аноде [3], при этом результирующее поле становится неоднородным.

В настоящей работе исследовалось влияние неоднородности продольного магнитного поля на транспортировку плазмы из вакуумно-дугового источника в цилиндрический плазмодом. Полученные результаты использованы для оптимизации процесса нанесения углеродсодержащих сверхтвердых покрытий из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы; измерены некоторые физико-механические характеристики полученных покрытий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Плазма генерируется вакуумно-дуговым разрядом постоянного тока с магнитным удержанием катодного пятна на торце катода и с магнитной фокусировкой плазменного потока в полости трубчатого анода. Для улучшения стабильности разряда применена анодная вставка 5 [4]. В качестве материала катода использовались титан и графит. Плазмодом 11 и катушки 9 и 10 моделируют входную секцию магнит-

ного фильтра. Внутренние диаметры анода и плазмоведа составляют 180 мм; длина анода равна 200 мм; общая длина плазмоведущего канала 330 мм.

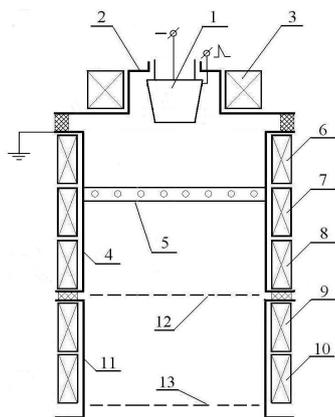


Рис. 1. Схема установки:

- 1 – катод; 2 – корпус; 3 – стабилизирующая магнитная катушка; 4 – анод; 5 – анодная вставка; 6-8 – фокусирующие магнитные катушки; 9-10 – транспортирующие магнитные катушки; 11 – плазмовод; 12-13 – позиции коллектора

Конфигурация магнитного поля в плазмоведущем канале регулировалась путем ступенчатого изменения тока I_{st} в стабилизирующей катушке 3 и в катушках 6 и 7 (I_{f67}). Токи в катушках 8, 9 и 10 были фиксированы. При этом максимальное поле на оси системы составляло $B_t = B_{max} = 25 \dots 28$ мТ. Магнитное поле в плазмоводе измерялось с помощью холловского магнитометра.

Ионная компонента плазменного потока регистрировалась коллектором в виде диска диаметром 167 мм, который размещался либо на срезе анода (позиция 12), либо на выходе плазмоведа (позиция 13). На диск подавалось отрицательное смещение (-70 В) относительно заземленного анода.

С помощью оптимизированного вакуумно-дугового источника углеродной плазмы с решетчатой анодной вставкой в комплекте с 90° сепаратором плазмы [5] были получены два типа сверхтвердых покрытий: из алмазоподобного углерода (АПП) и фуллереноподобного нитрида углерода (CN_x с соотношением $N/C \approx 0,1$). Исследованы их механические и трибологические характеристики. Осаждение покрытий осуществлялось на образцы из нержавеющей стали $\varnothing 25,4$ мм. Синтез нитрида углерода осуществлялся в атмосфере газообразного азота.

Содержание азота в нитридуглеродных покрытиях (CN_x) измерялось с помощью зондового рентгеновского фотоэлектронного спектрометра.

Физико-механические характеристики покрытий измеряли с помощью наноиндентора ХР с алмазным индентором Берковича. Индентор погружался на глубину до 150 нм. Верхние ненагруженные участки кривых погружения использовались для расчетов модулей упругости [6].

Тесты на трение проводились в герметичной камере при атмосферном давлении и температуре $25^\circ C$ в двух вариантах условий: в сухом азоте и в воздухе с влажностью 40%. Содержание влаги в азоте контролировалось и не превышало 1% (предела чувствительности использованного датчика влажности). В качестве контртела применялись шарики из стали и карбида кремния. Во всех экспериментах нагрузка составляла 1 Н, скорость скольжения была $125 \dots 200$ мм/с при частоте вращения 200 об/мин. Коэффициент трения определялся после 10^4 оборотов (циклов скольжения), по достижении стационарного состояния пары трения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены распределения продольной компоненты магнитного поля B_z вдоль оси системы. Параметром кривых является величина тока (I_{f67}) в катушках 6 и 7. Знак “-” перед I_{f67} означает, что магнитное поле катушек 6 и 7 направлено встречно всем остальным. Из графиков видно, что магнитное поле имеет минимум $B_{min} = 1 \dots 20$ мТ вблизи катода на расстоянии $3 \dots 6$ см от его рабочей поверхности.

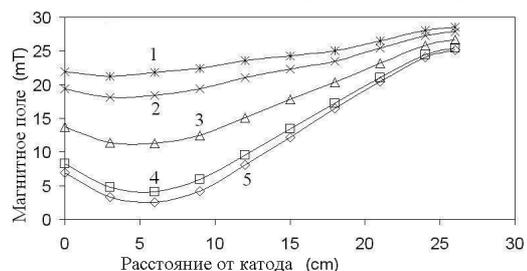


Рис. 2. Распределение продольной компоненты магнитного поля вдоль оси системы: ток I_{f67} равен 1.2 А (1); 0.8 А (2); 0 (3); -0.8 А (4); -1 А (5). Ток $I_{st} = 1.8$ А

На рис. 3 показаны зависимости выходного ионного тока I_i на коллектор в позициях 12 и 13 (см. рис. 1) от величины минимального магнитного поля B_{min} .

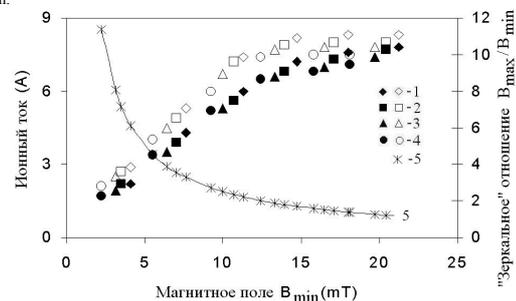


Рис. 3. Зависимость выходного ионного тока I_i (1-4) на коллектор 12 (прозрачные маркеры) и 13 (зачерненные маркеры) и «зеркального» отношения B_{max}/B_{min} (5) от величины B_{min} : ток $I_{st} = 1.8$ А (1); 1.6 А (2); 1.4 А (3); 1.2 А (4). Титановый катод. Ток дуги 100 А

Сравнение зависимостей позволяет оценить ослабление плазменного потока в плазмодоме. Максимальное значение выходного ионного тока уменьшается на 6% при удалении от среза анода на 130 мм.

На рис. 3 (кр. 5) показано также, как изменяется «зеркальное» отношение V_{\max}/V_{\min} в зависимости от минимального магнитного поля V_{\min} .

В ряде работ, посвященных исследованию механизмов потерь ионов при транспортировке плазмы в магнитном поле, указывается на роль как его минимальной величины V_{\min} в тракте, так и «зеркального» отношения V_{\max}/V_{\min} на входе в плазмодом [3,7,8]. Проанализируем влияние конфигурации магнитного поля на выходной ионный ток в наших экспериментах. Из зависимостей $I_z(z)$ (см. рис. 2) следует, что увеличение V_{\min} сопровождается уменьшением отношения V_{\max}/V_{\min} . Из графиков рис. 3 следует, что при увеличении магнитного поля вплоть до значения $V_{\min} = 12...13$ мТ происходит линейный рост I_z . Дальнейший рост V_{\min} приводит к насыщению $I_z(V_{\min})$. При этом «зеркальное» отношение V_{\max}/V_{\min} уменьшается от 8 до 2. Последующее увеличение

V_{\min} до 20 мТ и, соответственно, уменьшение «зеркального» отношения до 1.4, не приводит к росту выходного ионного тока. Мы полагаем, что насыщение ионного тока определяется достижением предельно допустимого при данном токе дуги значения. Отсюда можно заключить, что в наших экспериментах влияние «магнитного зеркала» с отношением $V_{\max}/V_{\min} < 2$ на транспортировку плазмы из источника в плазмодом несущественно.

На основании полученных данных по транспортировке вакуумно-дуговой плазмы в неоднородном магнитном поле можно сделать вывод, что оптимизация магнитной конфигурации в трубчатом аноде с анодной вставкой обеспечивает не только стабильность дугового разряда [9], но и минимизацию потерь плазмы внутри анода. Это позволяет получать высококачественные покрытия в условиях повышенной скорости осаждения.

Нами были получены два различных типа покрытий: алмазоподобные (АПП) и фуллереноподобные CN_x . Результаты исследования их механических и трибологических характеристик отображены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Механические характеристики АПП и CN_x покрытий

Тип покрытия	Содержание азота ат. %	Микротвердость, GPa	Модуль упругости, GPa	Напряжения, GPa
АПП	0	57 ± 5	560 ± 40	-4.9
CN_x	10	28 ± 1	260 ± 10	-4.4

Таблица 2

Трибологические характеристики АПП и CN_x покрытий

Тип покрытия	Содержание азота ат. %	Коэфф. трения (сталь)		Коэфф. трения (SiC)		Коэффициент износа в паре с SiC ($\text{мм}^3/\text{Нм}$) $\times 10^7$	
		Воздух 40% H_2O	сухой N_2	Воздух 40% H_2O	сухой N_2	Воздух 40% H_2O	сухой N_2
АПП	0	0.1	нестаб.	0.11	0.09...0.7	1.5	80
CN_x	10	0.2...0.4	нестаб.	0.3	0.04	9.5	30

На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов трения пар сталь- CN_x и сталь-АПП от количества циклов скольжения во влажном воздухе.

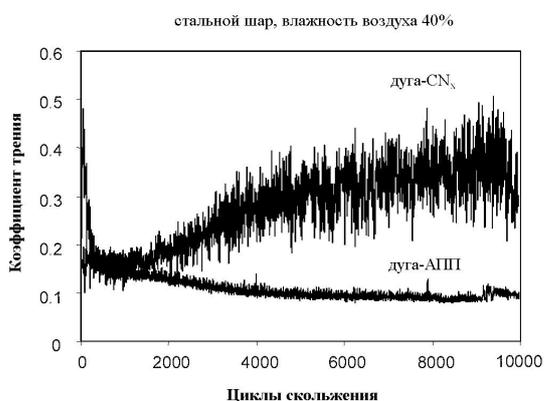


Рис. 4. Динамика изменения коэффициента трения пар сталь- CN_x и сталь-АПП во влажном воздухе

На рис. 5 показаны зависимости коэффициентов трения пары карбид кремния- CN_x от количества циклов скольжения в сухом азоте и во влажном воз-

духе. Из этих зависимостей видно, что трибологические характеристики АПП и CN_x -покрытий сильно отличаются: в воздухе с влажностью 40 % коэффициент трения пары сталь-АПП имеет величину около 0.1, в то время как коэффициент трения пары сталь- CN_x составляет около 0.3 и при этом совершает значительные осцилляции в течение всего времени испытания. В сухом азоте коэффициент трения пары сталь-АПП и пары сталь- CN_x в процессе измерения испытывает резкие скачки, изменяясь от 0.05 до 0.8, т.е. процесс трения в этих условиях является нестабильным.

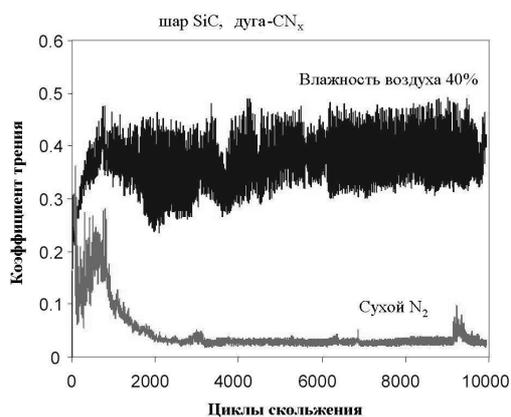


Рис. 5. Динамика изменения коэффициента трения пары карбид кремния-CN_x в сухом азоте и во влажном воздухе

В случае использования в качестве контртела карбида кремния, имеющего твердость 28 ГПа, приближающуюся к твердости исследованных покрытий, влияние износа шарика на процесс трения значительно снижалось.

Значения коэффициентов трения АПП и CN_x по карбиду кремния во влажном воздухе и в сухом азоте приведены в табл. 2. Для влажного воздуха характеристики трения АПП и CN_x по карбиду кремния и по стали практически совпадают. Для сухого азота было зафиксировано значительное уменьшения коэффициента трения пары карбид кремния-CN_x (по сравнению с условиями влажного воздуха; см. рис. 5).

Величина износа АПП для пары трения карбид кремния-АПП весьма мала во влажном воздухе и резко возрастает в сухом азоте. В то же время износ CN_x-покрытия для пары трения карбид кремния-CN_x слабо зависит от условий газовых сред, использованных в эксперименте. Следует отметить, что несмотря на высокий коэффициент трения во влажном воздухе износ CN_x-покрытия в этой среде меньше, чем в сухом азоте.

Из результатов проведенных тестов видно, что АПП превосходят CN_x-покрытия во влажной среде как с позиции более низкого коэффициента трения, так и меньшего износа. Однако CN_x-покрытия могут оказаться предпочтительнее в случае малых величин нормальных нагрузок, когда допустимым является более высокий коэффициент трения.

ВЫВОДЫ

Определено оптимальное условие транспортировки плазменного потока в неоднородном магнитном поле из вакуумно-дугового источника с решетчатой анодной вставкой внутри трубчатого анода в плазмод. Это условие сводится к следующему со-

отношению: $V_{max}/V_{min} < 2$, где V_{min} – величина магнитного поля в аноде вакуумно-дугового источника и V_{max} – величина магнитного поля в плазмод. В оптимальных условиях транспортировки плазмы получены два типа сверхтвердых покрытий: алмазоподобные (АПП) и фуллереноподобные CN_x. Исследованы их механические и трибологические свойства. АПП имеют микротвердость около 57 ГПа и модуль упругости 560 ГПа, CN_x – микротвердость 28 ГПа и модуль упругости 260 ГПа. Коэффициент трения АПП по карбиду кремния и стали мал во влажном воздухе (0.1), но нестабилен в сухом азоте. Коэффициент трения CN_x по карбиду кремния в сухом азоте чрезвычайно низок (0.03...0.04), а во влажном воздухе значительно выше (0.3). При этом величина износа CN_x покрытия находится в пределах $(1...3) \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$.

Работа выполнена в рамках Программы проведения фундаментальных исследований по атомной науке и технике НИЦ ХФТИ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.R.L. Boxman. Recent developments in vacuum arc deposition //IEEE Transactions on Plasma Science. 2001, v. 29, p. 759-761.
- 2.A. Anders. Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro- and nanoparticles: a review //Surf. Coat. Technol. 1999, v. 120-121, p. 319-330.
- 3.I.I. Aksenov, V.G. Padalka, V.T. Tolok, V.M. Khoroshikh. Investigation of vacuum-arc plasma flow motion in plasma-optics //Fizika Plazmy. 1980, v. 6, N. 4, p. 918-924 (in Rus.).
- 4.Zhang Tao, ZHANG Hui-Xing, Ian G.Brown, Paul K. Chu. Assistant anode in a cathodic arc plasma source //Chin. Phys. Lett. 2001, v.18, p. 1103-1104.
- 5.I.I. Aksenov, V.E. Strel'nitskij, V.V. Vasilyev, D.Yu. Zaleskij. Efficiency of magnetic plasma filters //Surf-Coat.Technol. 2003, v.163-164, p.118-127.
- 6.W.C. Oliver, G.M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments //J.-Mater.Res. 1992, v. 7, p. 1564-1583.
- 7.S. Anders, A. Anders and Ian Brown. Focused injection of vacuum arc plasmas into curved magnetic filters //J.Appl.Phys. 1994, v.75, p. 4895-4899.
- 8.M. Bilek, Y. Yin and D. McKenzie. A study of filter transport mechanisms in filtered cathodic vacuum arcs //IEEE Transactions on Plasma Science. 1996, v. 24, p.1165-1173.
- 9.I.I. Aksenov, V.V. Vasilyev, A.A. Luchaninov, A.O. Omarov, V.E. Strel'nitskij, D. Yu.Zaleskij, J.S. Zabinski, A.A. Voevodin. High Efficiency Filtered Vacuum-Arc Plasma Source //Proc. XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Yalta, Crimea, 2004, p. 491-494.

ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОЇ ПЛАЗМИ В НЕОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

І.І. Аксьонов, В.В. Васильєв, О.А. Лучанінов, В.Є. Стрельницький

Експериментально досліджено транспортування вакуумно-дугової плазми в циліндричному плазмоді з аксиально симетричним неоднорідним магнітним полем. Проведено аналіз впливу продольної неоднорідності магнітного поля на процеси створення та транспортування вакуумно-дугової плазми. Показано, що наявність "магнітного дзеркала" з відношенням $V_{max}/V_{min} < 2$, де V_{min} – величина магнітного поля в аноді вакуумно-дугового джерела (фокусуюче поле), V_{max} – величина магнітного поля в плазмоді (транспортує магнітне поле), не призводить до погіршення умов транспортування плазми з вакуумно-дугового

джерела до плазмоводу. Результати що отримані використано для оптимізації процесів нанесення надтвердих покриттів з фільтрованої вакуумно-дугової плазми; приведено деякі характеристики зразків таких покриттів.

VACUUM-ARC PLASMA TRANSPORT IN NON-HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD

I.I. Aksenov, V.V. Vasilyev, A.A. Luchaninov, V.E. Strel'nitskij

The plasma stream transport from the vacuum arc plasma generator along the plasma duct with the inhomogeneous longitudinal magnetic field inside it is investigated experimentally. The influence of longitudinal magnetic field non-homogeneity on vacuum arc plasma generation and bringing it into the plasma duct is analysed. It is shown that the affect of the "magnetic mirror" with ratio value $B_{\max}/B_{\min} < 2$, where B_{\max} is the magnetic field inside the plasma duct (transporting field), B_{\min} is the magnetic field inside the anode (focusing field), on plasma stream transport is negligible in our experiments. The results obtained are used for the process optimization of filtered cathodic arc deposition of superhard carboncontained coatings. Some properties of the coatings obtained are measured.