

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118>

НЕОДНОРОДНОСТЬ ПУЧКА УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ УСТАНОВКИ УВНИПА- 1-001

Научная статья

Прокопьева О.Е.^{1,*}, Войнов В.С.², Райков Д.В.³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (prokopevaolga16[at]gmail.com)

Аннотация

Представлены результаты исследования, посвященного анализу влияния магнитного поля на поток углеродной плазмы. Был исследован поток углеродной пушки, используемой в установке UVNIPA–1–001, и проанализирована его структура методом магнитной сепарации с целью оптимизации и повышения качества метода вакуумного ионно-плазменного осаждения пленочных покрытий. Провели теоретическое моделирование траекторий скопления частиц массой 1, 10 и 100 а.е.м. В рамках эксперимента осуществили разделение углеродного пучка на медной подложке. Полученные результаты масс потенциального разделения показывают, что поток плазмы состоит из двух фаз: ионной и капельной. Каждая из этих фаз имеет разный характер осаждения на медной подложке, что обусловлено отклонением в магнитном поле.

Ключевые слова: ионная и капельная фазы, отклонение частиц в магнитном поле, пучок углеродной плазмы.

CARBON FLOW HETEROGENEITY OF THE FACILITY UVNIPA-1-001

Research article

Prokopeva O.Y.^{1,*}, Voinov V.S.², Raikov D.V.³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (prokopevaolga16[at]gmail.com)

Abstract

The results of the research focused on the analysis of the effects of magnetic field on carbon plasma flow are presented. The flow of carbon cannon used in the facility UVNIPA-1-001 was investigated, and its structure was analysed by magnetic separation in order to optimize and enhance the quality of vacuum ion-plasma deposition method of film coating. Theoretical modelling of trajectories of particles' clusters with mass 1, 10 and 100 amu were made. As part of the experiment, the separation of a carbon beam on a copper substrate was carried out. The obtained results of mass-potential separation show that the plasma flow consists of two phases: ion and droplet. Each of these phases has a different deposition pattern on the copper substrate, which is due to deviation in the magnetic field.

Keywords: ion and droplet phases, deviation of particles in a magnetic field, carbon plasma beam.

Введение

Наблюдается растущая тенденция использования покрытий из углеродных пленок в медицинской сфере. Известно, что существует множество способов их биомедицинского применения. Алмазоподобные покрытия (DLC) обладают превосходными трибологическими свойствами и цитосовместимостью, не влияют на целостность клеток [1], повышают гемосовместимость, поэтому их используют в качестве покрытий для контактирующих с кровью имплантатов, например, искусственных кровеносных клапанов или коронарных стентов [2]. Также многочисленные исследования показывают, что пленки DLC высокоэффективны против коррозии [3], [4], обладают замечательной твердостью и превосходными механическими свойствами [5], что позволяет применять их для шарнирных твердых имплантатов [6].

Углеродное покрытие получено методом вакуумного ионно-плазменного осаждения. Материал катода распыляется мощным ионным пучком. Процесс начинается с зажигания вакуумной дуги, которая вызывает появление зон эмиссии или «катодных пятен» на поверхности катода [7]. Катодные пятна генерируют ускоренный пучок углеродной плазмы в направлении подложки. Из-за явления взрывной электронной эмиссии поверхности катода наносится ущерб, приводящий к выбросу капель, плазмы и паров углерода [8]. Это приводит к основному недостатку этого способа: присутствие микрочастиц в потоке плазмы – капельной фазы материала катода, которая снижает характеристики поверхностного слоя, когда контактирует с ней.

Решением указанной выше проблемы может быть разделение потока углеродной плазмы на капельную и ионную фазы с помощью магнитного поля. Такие системы широко используются в технологических установках [9]. Поэтому данная статья будет сосредоточена на исследовании поведения частиц углеродного потока в магнитном поле.

Методы и принципы исследования

Процесс магнитной сепарации проводился на установке УВНИПА-1-001, расположенной на кафедре экспериментальной физики Физико-технологического института Уральского федерального университета. Установка предназначена для нанесения алмазоподобных упрочняющих покрытий на режущие инструменты, микроинструменты, подверженные трению и износу, с использованием генератора импульсной углеродной плазмы со средней энергией ионов около 100 эВ, что позволяет увеличить скорость ионов за счет приложения отрицательного

потенциала к подложке без дополнительного ускорения ионов. Импульсный характер процесса конденсации, характеризующийся длительными паузами (продолжительность паузы в десять раз больше продолжительности плазменного разряда), позволяет улучшить отвод тепла из зоны конденсации, что обеспечивает формирование алмазоподобных структур в более широком диапазоне температур.

Источник ионного травления типа «Радикал» используется для предварительной ионной очистки обрабатываемых деталей. Окончательная очистка, нагрев деталей, закрепленных на планетарной карусели, проводится с использованием электродугового испарителя с разделением потока плазмы в магнитном поле. Использование этого испарителя исключает возможность попадания капельной фазы распыляемого материала на обрабатываемые детали.

Эксперименты проводились с использованием медной подложки. Предварительно её очищали методом травления ионами аргона в течение 5 минут. Давление в рабочей камере составляло $2 \cdot 10^{-4}$ Торр. Нанесение пленки DLC проводилось под давлением $1,9 \cdot 10^{-5}$ Торр без ионов Ag^+ , частота дуги составляла $f = 3$ Гц, а при работе генератора углеродной плазмы давление в вакуумном блоке повышалось до $2,3 \cdot 10^{-5}$ Торр. Мишень располагалась на расстоянии 0,15 м от магнитной системы под углом 30 градусов к первоначальному направлению луча.

Результаты и обсуждение

На основе значений, первоначально определенных установкой (заряд частиц, масса, энергия потока, характеристики магнитов и линейные размеры камеры установки), смоделировали распределение потока ионов для каждого конкретного значения массы (см. рис. 1, рис. 2) и гистограммы плотности распределения потока ионов углерода (см. рис. 3, рис. 4). Для более четкого визуального представления траектории частиц мы взяли атомные массы кластеров, величины которых различаются на порядок: 1, 10, 100 а.е.м. Мы также приняли во внимание зарядовые составляющие, равные +1, +2, +3 от заряда электрона. Энергия ионного пучка варьировалась от 40 эВ до 80 эВ. Нашей целью было определить оптимальный угол наклона медной мишени, при котором будет видно отделение частиц, поэтому для графического представления мы взяли диапазон от 30 до 45 градусов. На рисунках 1 и 2 граничные углы наклона мишени (30 и 45°) показаны линиями фиолетового и зеленого цвета соответственно.

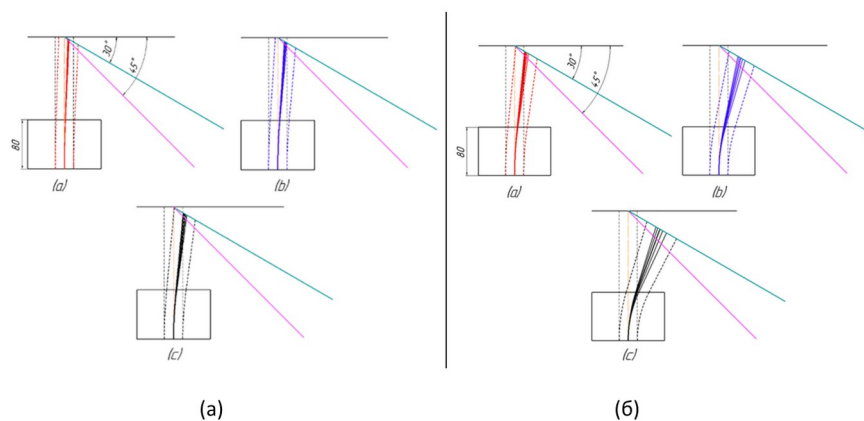


Рисунок 1 - Графическая модель, представляющая влияние магнитного поля на траекторию потока углерода: а – траектории для частиц с массой $m = 100$ а.е.м. и электрическим зарядом: (а) $(+1)e$; (б) $(+2)e$; (с) $(+3)e$; б – траектории для частиц с массой $m = 10$ а.е.м. и электрическим зарядом: (а) $(+1)e$; (б) $(+2)e$; (с) $(+3)e$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118.1>

Примечание: светло-серая пунктирная линия показывает начальное направление потока ионов, цветные пунктирные линии обозначают края луча

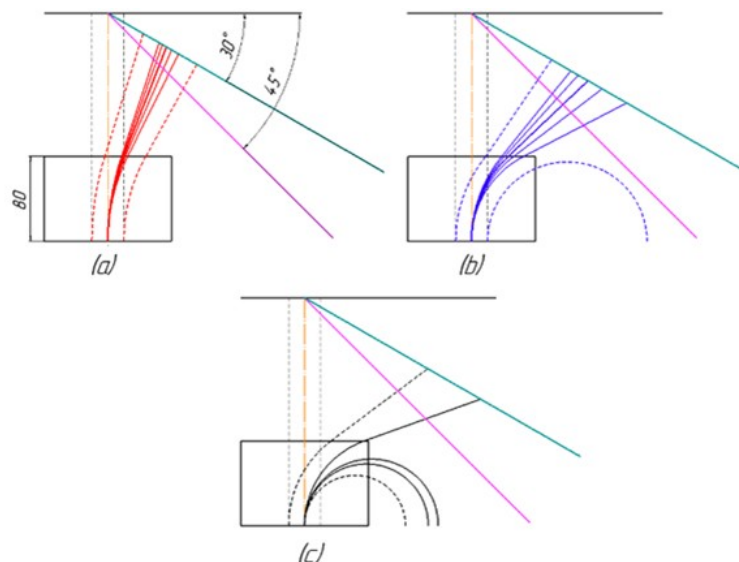


Рисунок 2 - Графическая модель, представляющая влияние магнитного поля на траекторию потока углерода
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118.2>

Примечание: изображены траектории для частиц с массой $m = 1$ а.е.м. и электрическим зарядом: (a) $(+1)e$; (b) $(+2)e$; (c) $(+3)e$

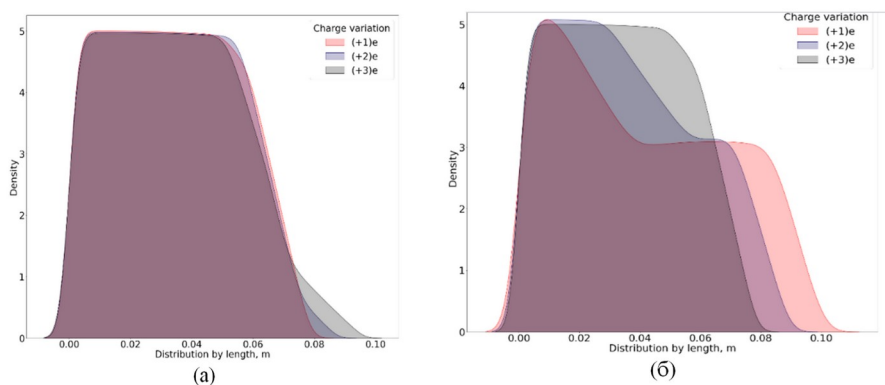


Рисунок 3 - Математическая модель распределения ионов углерода по координатам для кластеров частиц с: (a) массой = 100 а.е.м, (б) массой = 10 а.е.м. под углом 30 градусов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118.3>

Примечание: charge variation – значения электрических зарядов, используемые в эксперименте.

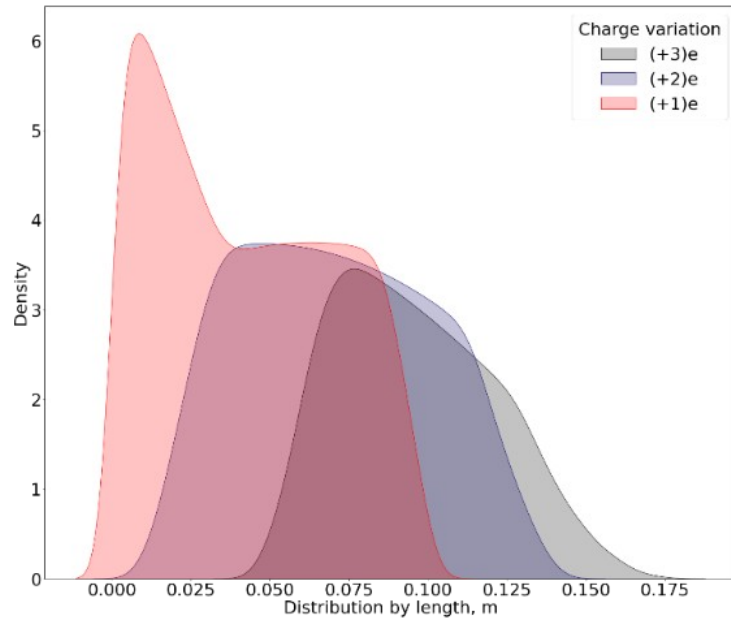


Рисунок 4 - Математическая модель распределения ионов углерода по координатам для кластеров частиц с массой = 1 а.е.м. под углом 30 градусов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118.4>

Во время эксперимента углеродный пучок подвергался воздействию электрического и магнитного полей, что привело к образованию двух пятен на мишени (см. рисунок 5). Не все частицы достигли поверхности, так как они подверглись сильному отклонению в магнитном поле, их радиусы были меньше размеров магнитов, поэтому они остались в рабочей камере установки. Светлые пятна указывают на самую высокую степень концентрации скоплений углеродных частиц. Как мы можем видеть, цвет подложки постепенно возвращается к исходному, демонстрируя уменьшение количества частиц.

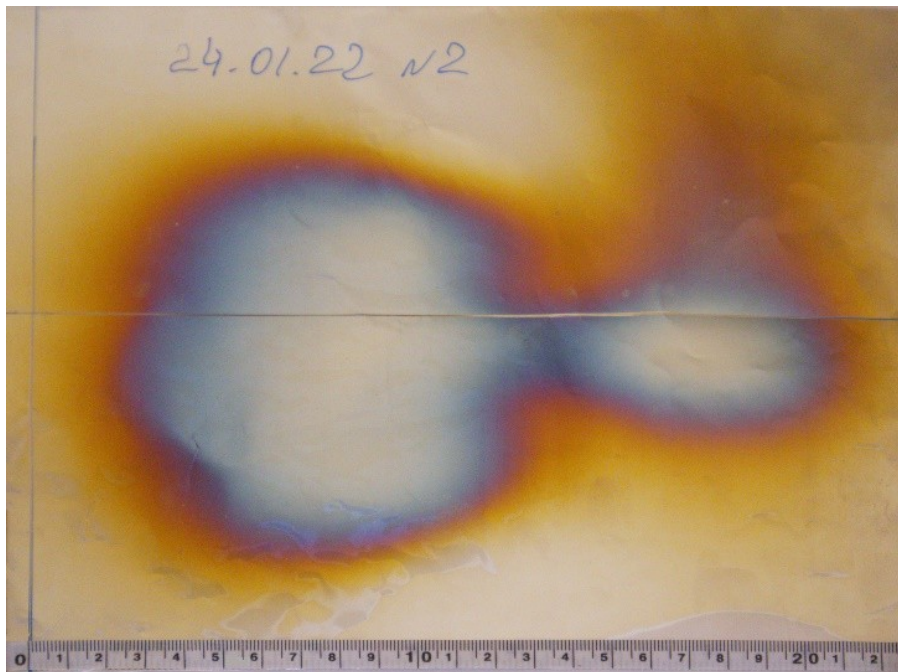


Рисунок 5 - Фотография медной мишени после эксперимента по разделению потока
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.118.5>

Каждое из пятен соответствует компонентам потока, содержащим элементы с одинаковым электрическим зарядом и массой. Пятно, которое находится ближе к контрольной точке, отображает местоположение попадания скоплений тяжелых частиц или капельной фазы углеродного пучка. Предполагается, что капельная фаза не отклонялась на значительный угол из-за ее высокой массы и величины заряда. Меньшее по диаметру и расположенное дальше пятно представляет собой ионную фазу, содержащую кластеры частиц массой 1 а.е.м. По сравнению с капельной фазой,

ионная в большей степени подвержена влиянию магнитного поля. Угол отклонения значительно больше, поэтому частицы ионной фазы четко отделяются от тяжелых скоплений в углеродном пучке.

Учитывая, что математическое моделирование соответствует полученным результатам, такие приближенные расчеты могут быть выполнены при различных характеристиках потока углеродной плазмы, чтобы более точно определить положение для размещения мишени-подложки.

Результаты, полученные с помощью УВНИПА-1-001, позволяют считать, что происходит разделение потока не только на фазы, но и по массе и заряду, то есть процесс масс-сепарации заряженных частиц, что согласуется с результатами экспериментов, проведенных Ю. В. Коробкиным и др. [10].

Также можно предположить, что поток не полностью разделяется на две фазы, некоторые скопления частиц могут пересекаться. Принимая во внимание, что кластеры с массой 10 а.е.м имеют несколько иное распределение по поверхности, чем кластеры с массой 100 а.е.м, можем выдвинуть гипотезу о том, что существует дисперсия капельной фазы, и она в основном определяется массой ее микрочастиц. Предположительно, такое разделение капельной фазы на крупные и мелкие частицы также может способствовать улучшению поверхностных свойств пленок за счет уменьшения микродефектов покрытия.

Заключение

Анализ неоднородности потока углерода на установке УВНИПА-1-001 позволяет сделать следующие выводы:

1. Характер отклонения капельной и ионной фаз пучка углеродной плазмы под воздействием магнитного поля отличается вследствие разных масс и зарядовых составляющих частиц каждой из фаз.
2. Благодаря раздельному распределению исследуемых фаз на подложке теперь существует возможность получать углеродные покрытия более высокого качества путем немеханического удаления капельной фазы.
3. Информация о массе и распределении ионов частиц позволяет определить в камере положение для установки мишени-подложки, где может находиться только ионная фаза потока углерода и полностью отсутствует присутствие тяжелых кластеров.

Благодарности

Авторы благодарят Нешова Федора Григорьевича и Сметанина Геннадия Ивановича за помощь в подготовке и проведении эксперимента, а также за полезные дискуссии.

Acknowledgement

The authors thank Neshov Fyodor Grigorievich and Smetanin Gennady Ivanovich for their help in preparing and conducting the experiment and for helpful discussions.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Matsumoto R. Cytotoxicity and tribological property of DLC films deposited on polymeric materials / R. Matsumoto, K. Sato, K. Ozeki [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2008. — Vol. 17. — P. 1680–1684.
2. Hauert R. A review of modified DLC coatings for biological applications / R. Hauert // *Diamond and Related Materials*. — 2003. — Vol. 12. — P. 583–589.
3. Huang G. F. The mechanical performance and anti-corrosion behavior of diamond-like carbon film / G. F. Huang, Z. Lingping, H. Wei-qing [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2003. — Vol. 12. — P. 1406–1410.
4. Zhao Q. Revealing the corrosion resistance of amorphous carbon films under heat shock via annealing / Q. Zhao, Z. Mou, B. Zhang [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2020. — Vol. 102. — 107692 p.
5. Zhang T. F. Wear and corrosion properties of diamond like carbon (DLC) coating on stainless steel, CoCrMo and Ti6Al4V substrates / T. F. Zhang, Q. Deng, B. Liu [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. — 2015. — Vol. 273. — P. 12–19.
6. Vila M. Hard a-C/DLC coatings on Si3N4–bioglass composites / M. Vila, E. Salgueiredo, M. Amaral [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2006. — Vol. 15. — P. 944–947.
7. Месяц Г. А. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. — М.: Наука, 2000. — 424 с.
8. Mesyats G. A. Ecton Mechanism of the Cathode Spot Phenomena in a Vacuum Arc / G. A. Mesyats // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2013. — Vol. 41. — № 4. — P. 676–694.
9. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders. — New York: Springer, 2008. — 543 p.
10. Коробкин Ю. В. Зарядовая сепарация плазменного потока при движении в криволинейном магнитном поле / Ю. В. Коробкин, Н. В. Лебедев, В. Л. Паперный // *Письма в ЖТФ*. — 2012. — Т. 38. — С. 78–82.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Matsumoto R. Cytotoxicity and tribological property of DLC films deposited on polymeric materials / R. Matsumoto, K. Sato, K. Ozeki [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2008. — Vol. 17. — P. 1680–1684.
2. Hauert R. A review of modified DLC coatings for biological applications / R. Hauert // *Diamond and Related Materials*. — 2003. — Vol. 12. — P. 583–589.
3. Huang G. F. The mechanical performance and anti-corrosion behavior of diamond-like carbon film / G. F. Huang, Z. Lingping, H. Wei-qing [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2003. — Vol. 12. — P. 1406–1410.
4. Zhao Q. Revealing the corrosion resistance of amorphous carbon films under heat shock via annealing / Q. Zhao, Z. Mou, B. Zhang [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2020. — Vol. 102. — 107692 p.

5. Zhang T. F. Wear and corrosion properties of diamond like carbon (DLC) coating on stainless steel, CoCrMo and Ti6Al4V substrates / T. F. Zhang, Q. Deng, B. Liu [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. — 2015. — Vol. 273. — P. 12–19.
6. Vila M. Hard a-C/DLC coatings on Si₃N₄–bioglass composites / M. Vila, E. Salgueiredo, M. Amaral [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2006. — Vol. 15. — P. 944–947.
7. Month G. A. Jektony v vakuumnom razrjade: proboj, iskra, duga [Ectons in a vacuum discharge: breakdown, spark, arc] / G. A. Month. — М. : Nauka, 2000. — 424 p. [in Russian]
8. Mesyats G. A. Ecton Mechanism of the Cathode Spot Phenomena in a Vacuum Arc / G. A. Mesyats // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2013. — Vol. 41. — № 4. — P. 676–694.
9. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders. — New York : Springer, 2008. — 543 p.
10. Korobkin Yu. V. Zarjadovaja separacija plazmennogo potoka pri dvizhenii v krivolinejnom magnitnom pole [Charge separation of a plasma stream when moving in a curved magnetic field] / Yu. V. Korobkin, N. V. Lebedev, V. L. Paperny // *Pis'ma v ZhTF* [Letters in ZhTF]. — 2012. — Vol. 38. — P. 78–82. [in Russian]