

**INFLUENCE OF THE HOLLOW CATHODE SHAPE ON THE PLASMA
PARAMETERS OF A NON-SELF-SUSTAINED GLOW DISCHARGE
WITH EXTERNAL ELECTRON INJECTION**

Danil Yurievich Ignatov^a, Vladimir Viktorovich Denisov, Sergey Sergeevich Kovalsky

Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academicheskyy pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

^a danilabay29@ya.ru

ABSTRACT

This work is devoted to the study of low-temperature plasma generation processes in extended and complex hollow cathodes. The plasma generation system is a two-discharge system, where the main discharge is ignited inside a hollow cathode, at one end of which the anode of the main discharge is located, and at the opposite end there is a grid through which additional electrons are injected from the auxiliary discharge plasma. The paper shows the possibility of generating a homogeneous plasma inside a curved (at 90°) hollow cathode and inside two hollow cathodes arranged in parallel. The length of the cathodes was 300 mm with an inner diameter of 25 mm. The pressure in the discharge system was up to 1 Pa at a voltage of up to 300 V and a current of up to 10 A. The parameters of the main discharge plasma were measured using double Langmuir probes installed along the hollow cathodes. The measurement results showed that the coefficient of plasma concentration inhomogeneity is $\pm 23\%$ in a curved hollow cathode, and up to $\pm 35\%$ along each cavity in a discharge system with two parallel cathodes, and the deviation from the average value of the plasma concentration in comparison of two parallel hollow cathodes amounted to $\pm 11\%$. The results obtained can be useful for creating low-temperature plasma generation systems for the implementation of ion-plasma processing of the inner surface of extended metal products of complex shape in order to increase their service life by a factor.

KEYWORDS

Low-pressure gas discharge; glow discharge; heated cathode discharge; hollow cathode; low-temperature plasma.

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОЛОГО КАТОДА НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ
НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА
С ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ**

Данил Юрьевич Игнатов^a, Владимир Викторович Денисов, Сергей Сергеевич Ковальский

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

^a danilabay29@ya.ru

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена исследованию процессов генерации низкотемпературной плазмы в протяженных и сложных полых катодах. Система генерации плазмы представляет из себя двухразрядную систему, где основным разряд зажигается внутри полого катода, с одного торца которого расположен анод основного разряда, а с противоположного торца установлена сетка, через которую происходит инжекция дополнительных электронов из плазмы вспомогательного разряда. В работе показана возможность генерации однородной плазмы внутри изогнутого (под 90°) полого катода и внутри двух полых катодов, расположенных параллельно. Длина катодов составляла 300 мм с внутренним диаметром 25 мм. Давление в разрядной системе составляло до 1 Па при напряжении до 300 В и токе до 10 А. Параметры плазмы основного разряда измерялись с помощью двойных зондов Ленгмюра, установленных вдоль полых катодов. Результаты измерений показали, что коэффициент неоднородности концентрации плазмы составляет $\pm 23\%$ в изогнутом полом катоде, и до $\pm 35\%$ вдоль каждой полости в разрядной системе с двумя катодами, расположенными параллельно, а отклонение от среднего значения величины концентрации плазмы в сравнении двух параллельных полых катодов составило до $\pm 11\%$. Полученные результаты могут быть полезны для создания систем генерации низкотемпературной плазмы для реализации процессов ионно-плазменной обработки внутренней поверхности протяженных металлических изделий сложной формы с целью кратного увеличения их срока службы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Газовый разряд низкого давления; тлеющий разряд; разряд с накалимым катодом; полый катод; низкотемпературная плазма.

Введение

В различных отраслях промышленности используется широкая номенклатура протяженных, ≥ 1 м длиной, металлических изделий трубчатой формы. Такие изделия имеют низкий срок службы вследствие коррозионного и абразивного износа внутренней поверхности и эксплуатации их в тяжелых рабочих условиях. Несмотря на использование в промышленности методов электрохимической обработки и газовых методов химикотермической обработки, в настоящее время существует высокий спрос на экологически чистые, эффективные и универсальные решения для обработки внутренней поверхности трубчатых изделий с целью повышения их срока службы. Этим требованиям удовлетворяют методы ионно-плазменной обработки в плазменных образованиях при низком, около 1 Па, давлении.

В данной работе реализуется способ ионно-плазменной модификации внутренней поверхности в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Для решения задачи обработки внутренней поверхности протяженной полости требуется преодолеть две основные проблемы. Во-первых, необходимо осуществить генерацию плазмы с относительно высокой концентрацией ионов, при которой возможно достигнуть плотности ионного тока на катод (обрабатываемую поверхность) около ≈ 1 мА/см² для эффективной ионной очистки поверхности, ионной имплантации (азота, кислорода, углерода) вглубь кристаллической решетки и разогрева обрабатываемого изделия до температуры не менее 450°C . Во-вторых, необходимо достигнуть низкой неоднородности концентрации плазмы вдоль всей внутренней полости полого катода, а также обеспе-

чить равномерное распределение других параметров, среди которых температура полого катода и плотность ионного тока на катод, то есть гарантировать величину этих параметров вблизи среднего значения.

Задача генерации однородной плазмы актуальна как для науки, так и для промышленности. На данный момент предложены различные способы генерации плазмы внутри металлического протяженного полого катода с целью ионно-плазменной обработки внутренней поверхности. В процессе генерации плазмы в разряде с полым катодом [1–4] при давлениях около 10 Па и выше обычно возникает высокая неоднородность концентрации плазмы вблизи торца полого катода, где расположен анод. Обычно наблюдается максимум и резкий спад на один или два порядка концентрации плазмы по направлению в глубь полого катода на расстояние пяти и более диаметров внутренней полости полого катода. Эту проблему можно решить, используя импульсный режим горения разряда с полым катодом, и таким образом избежать локального перегрева полого катода вблизи анода.

Во втором способе генерации плазмы с помощью тлеющего разряда в полом катоде протяженной формы [5–9] при давлениях около 100 Па и выше предлагается использовать анод, установленный коаксиально вдоль всей полости протяженного катода.

В третьем способе генерации плазмы внутри длинной металлической трубки предлагается использовать источник электронов, «электронную пушку» [10–16], и под воздействием ускоряющего напряжения направлять ускоренные электроны внутрь полости, в которой эти электроны производят ионизацию рабочего газа, а дополнительное отрицательное напряжение смещения позволяет ускорить и направить ионы на внутреннюю поверхность полой металлической труб-

ки. Данная система работает при давлениях от 1 Па и выше.

В данной работе представлен способ генерации плазмы внутри протяженного полого катода с помощью несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления (не выше 1 Па) с дополнительной инъекцией электронов из плазмы вспомогательного разряда с комбинированным накаливаемым и полым катодом.

Использование внешней инъекции электронов позволяет снизить рабочее давление разрядной системы. Снижение рабочего давления позволяет достичь большей длины свободного пробега электронов (от 10 см при давлении до 1 Па), что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента неоднородности распределения концентрации плазмы разряда за счет многократной осцилляции электронов по всей длине полого катода, длина которого может достигать более 10 см при внутреннем диаметре в 10 и более раз меньше длины полого катода. Также многократная осцилляция электронов в полом катоде позволяет создавать однородную плазму в изогнутых полостях, а также в полых катодах, расположенных параллельно и имеющих общий анод и общую область инъекции дополнительных электронов.

Использование дополнительной инъекции электронов при несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом позволяет получать высокую плотность ионного тока (порядка 10 мА/м²) при давлениях в полости не выше 1 Па и напряжениях горения разряда до 300 В. Также, ускоренные ионы в катодном слое при низком давлении не теряют энергию в столкновениях с атомами и молекулами, так как длина свободного пробега значительно больше ширины катодного слоя. Это позволяет эффективно осуществлять процессы химико-термической ионно-плазменной обработки внутренней полости

металлических изделий без использования водородосодержащих газов, а высокая плотность ионного тока сокращает длительность процессов азотирования по сравнению с азотированием в плазме самостоятельного тлеющего разряда при давлениях от 10 Па.

Данная работа посвящена расширению возможности ионно-плазменных методов обработки внутренней поверхности протяженных металлических полостей в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и с дополнительной инъекцией электронов из плазмы вспомогательного разряда.

1. Описание

экспериментальных исследований

В данной работе было изучено влияние формы полого катода на однородность генерируемой плазмы, для чего использовались два полых катода различной формы. Первый полый катод (рис. 1, а) был изогнут под углом 90° с общей длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм. Второй полый катод состоял из двух трубок (рис. 1, б), расположенных параллельно, длина которых составляла 300 мм каждая, а внутренний диаметр – 25 мм.

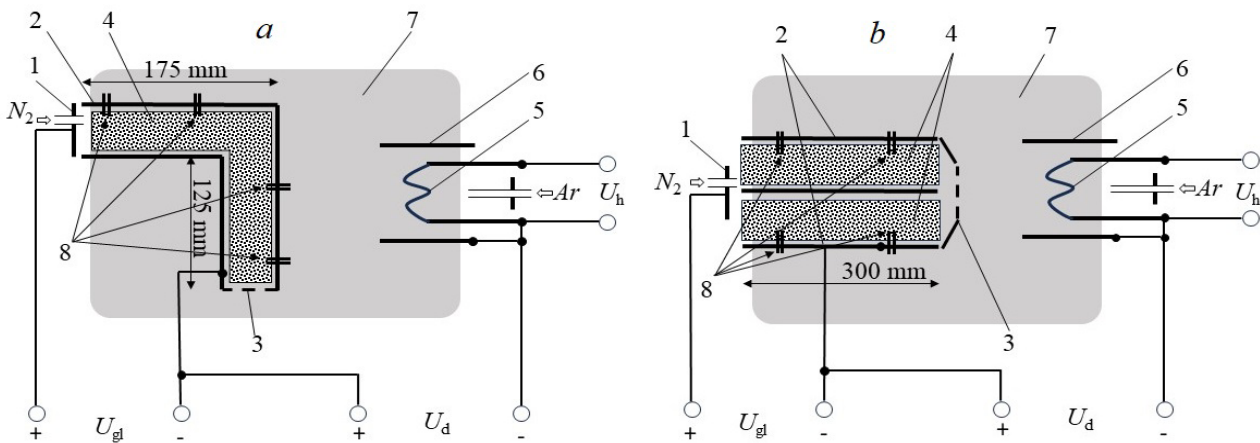


Рис. 1. Схемы разрядных систем:

а – двухразрядная система с изогнутым под угол 90° полым катодом;

б – двухразрядная система с двумя полыми катодами, расположенными параллельно;

1 – анод несамостоятельного тлеющего разряда; 2 – катод несамостоятельного тлеющего разряда;

3 – вольфрамовая решетка; 4 – плазма несамостоятельного тлеющего разряда; 5 – нагретый катод вспомогательного разряда; 6 – полый катод вспомогательного разряда; 7 – плазма вспомогательного разряда;

8 – двойные зонды Ленгмюра; U_{gl} – электропитание несамостоятельного тлеющего разряда;

U_d – электропитание вспомогательного разряда; U_h – электропитание нагретого катода; N_2 ,

Ar – напуск рабочих газов азота и аргона

Fig. 1. Schemes of discharge systems:

a – two-discharge system with a hollow cathode bent at an angle of 90°;

b – two-discharge system with two hollow cathodes arranged in parallel; 1 – anode of non-self-sustained glow discharge; 2 – non-self-sustained glow discharge cathode; 3 – tungsten grating; 4 – plasma of non-self-sustained glow discharge; 5 – hot cathode of the auxiliary discharge; 6 – hollow cathode of the auxiliary discharge;

7 – auxiliary discharge plasma; 8 – double Langmuir probes; U_{gl} – power supply of non-self-sustaining glow discharge; U_d – auxiliary discharge power supply; U_h – power supply of the heated cathode; N_2 , Ar – inlet of nitrogen and argon working gases

Генерация плазмы в протяженных полых катодах производилась с помощью двухразрядной системы (рис. 1). Основной разряд – несамостоятельный тлеющий разряд зажигался внутри длинной трубки 2, внутренние стенки которой являлись полым катодом, а анодом 1 являлся плоский водоохлаждаемый электрод, расположенный возле торца трубки. На противоположном торце трубки крепилась решетка из вольфрама 3, через которую производилась инжекция электронов из плазмы вспомогательного разряда 7, анодом которого была внешняя часть трубки и вольфрамовая сетка 2, 3. Катодом вспомогательного разряда являлся плазмогенератор «ПИНК», состоящий из накаливаемого вольфрамового 5 и полого 6 электродов. Электроны из вспомогательной плазмы, пролетая через вольфрамовую решетку, попадают под ускоряющее напряжение основного разряда и производят ионизацию рабочего газа в полном катоде основного разряда. Рабочее давление двухразрядной системы не превышает 1 Па, что позволяет достигать длины свободного пробега электронов в полном катоде основного разряда не менее 10 см, и за счет многократной осцилляции внутри полости производить ионизацию по всей длине катода. Более подробное описание разрядной системы с прямым катодом, а также основные зависимости параметров горения разрядов и параметров плазмы приведены в работах [17–20].

Параметры плазмы измерялись с помощью двойных зондов Ленгмюра 8, с длиной 6 мм и диаметром 0,4 мм каждый. ВАХ двойного зонда измерялась с помощью автоматизированной системы зондовых измерений параметров плазмы. Напряжение смещения между зондами линейно изменялось в пределах ± 70 В. Количество измерений одной точки напряжения и тока для одной ВАХ двойного зонда составляло 10000 значений. По полученной ВАХ двойного зонда рассчитывалась температура электронов и концентрация плазмы.

2. Результаты и обсуждение исследований

Для каждой из двухразрядных систем с изогнутым (под углом 90°) полым катодом и для полого катода, который состоял из двух трубок, расположенных параллельно были получены параметры плазмы несамостоятельного тлеющего разряда.

Для изогнутого полого катода (рис. 1, а), внутрь трубки устанавливались четыре двойных цилиндрических зонда на расстоянии 25 мм и 95 мм от торцов, где расположен анод и вольфрамовая решетка. Результаты зондовых исследований распределения концентрации плазмы и температуры электронов вдоль изогнутого полого катода несамостоятельного тлеющего разряда представлены на рис. 2.

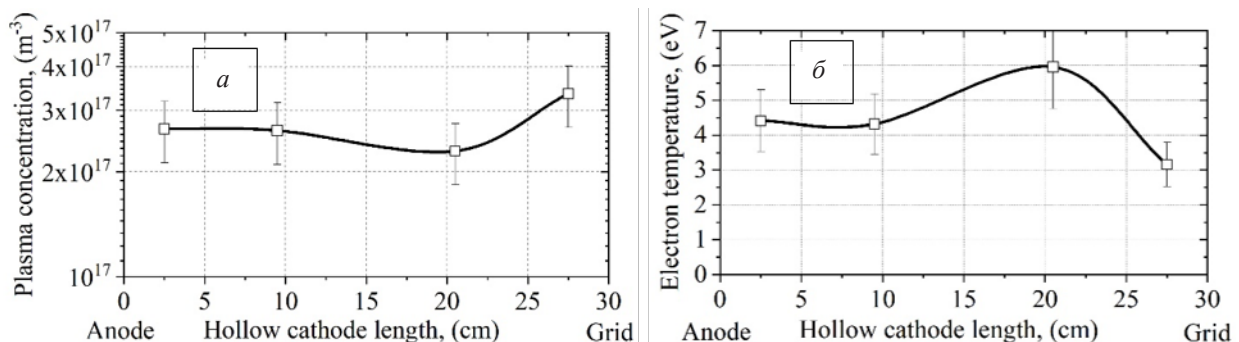


Рис. 2. Распределения концентрации плазмы (а) и температуры электронов (б) вдоль полого катода, изогнутого под 90°

Fig. 2. Plasma concentration (а) and electron temperature (б) distributions along a hollow cathode curved under the 90°

Измерения параметров плазмы были проведены при напряжении горения основного разряда 200 В и токе 3,2 А, токе вспомогательного разряда 1,6 А, давлении 0,7 Па и скорости натекания азота в полый катод 12 см³/мин. На графике (рис. 2, *a*), представлено распределение концентрации плазмы вдоль изогнутого полого катода. Средняя плотность ионного тока на цилиндрический зонд составляла не менее 9 мА/м². Коэффициент неоднородности концентрации плазмы составил $\pm 23\%$, что составляет максимальное отклонение от среднего значения (рассчитывался по формуле, приведенной в работе [18]). В сравнении с прямым полым катодом [19, 20], где коэффициент неоднородности концентрации плазмы при тех же параметрах горения разряда и размерах полого катода составил около $\pm 30\%$, в изогнутом полым катодом наблюдается снижение коэффициента неоднородности на $\pm 7\%$. Вероятно, снижение неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в полым катодом с изгибом на 90° связано с увеличением длины пути ускоренных электронов до ухода на анод и, как следствие, более эффективной утилизации их энергии в разряде по сравнению с прямым полым катодом, когда на пути ускоренных электронов отсутствуют препятствия. Данное предположение находит подтверждение в работе [17], в ко-

торой представлено распределение температуры и толщины модифицированного слоя при проведении процесса ионно-плазменного азотирования в изогнутом полым катодом. В данной работе показано, что для достижения температуры изогнутого полого катода 600–650 °С пришлось снизить ток несамостоятельного тлеющего разряда и вспомогательного разряда в изогнутом полым катодом примерно на 30%, в отличие от токов основного и вспомогательного разрядов с прямым полым катодом.

Распределение температуры электронов (рис. 2, *b*) в сравнении с прямым полым катодом практически совпадает и находится в диапазоне от 2,5 эВ до 6 эВ с минимумом в области инжекции электронов, где расположена вольфрамовая решетка и максимумом на расстоянии 200 мм от анода.

Во втором случае, когда использовался полый катод, состоящий из двух трубок, расположенных параллельно (рис. 1, *b*), устанавливались такие же двойные цилиндрические зонды по две штуки на одну трубку, на расстоянии 80 мм от торцов трубок. Результаты зондовых исследований распределения концентрации плазмы и температуры электронов несамостоятельного тлеющего разряда вдоль полого катода, состоящего из двух трубок представлены на рис. 3.

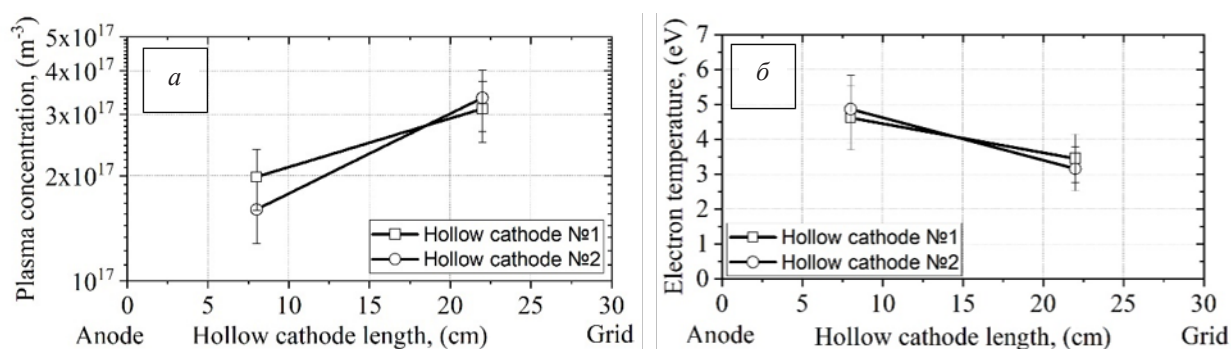


Рис. 3. Распределения концентрации плазмы (*a*) и температуры электронов (*b*) вдоль двух полых катодов, расположенных параллельно

Fig. 3. Plasma concentration distributions (*a*) and electron temperature distributions (*b*) along two hollow cathodes arranged in parallel

В данном случае измерения параметров плазмы проводились при напряжении горения основного разряда 200 В и токе 3,6 А, токе вспомогательного разряда 1,6 А, давлении 0,7 Па и скорости натекания азота в полый катод 12 см³/мин. На графике (рис. 3, а), представлено распределение концентрации плазмы вдоль прямых полых катодов. Средняя плотность ионного тока на цилиндрический зонд составляла не менее 6 мА/см². Коэффициент неоднородности концентрации плазмы первого полого катода составил $\pm 22\%$, а второго $\pm 35\%$. Если сравнивать с разрядной системой, где полый катод основного разряда состоял из одной трубки с такими же размерами [19, 20], то из результатов расчета в двух полых катодах видно, что коэффициент неоднородности концентрации плазмы в первом полой катоде ниже на $\pm 8\%$, а во втором полой катоде выше на $\pm 5\%$. Для получения более качественной картины распределения параметров плазмы в разрядной системе с двумя катодами в дальнейшем планируется провести измерения с большим количеством точек по длине полых катодов по аналогии со случаем одного полого катода.

При сравнении величин концентрации плазмы в полых катодах на равном расстоя-

нии от торцов наблюдается незначительное отклонение от среднего значения: на расстоянии 80 мм от торца, где расположен анод, отклонение составило $\pm 11\%$, а со стороны торца, где расположена вольфрамовая сетка, на расстоянии 80 мм отклонение составило $\pm 4\%$. Из вышеизложенного можно сделать предположение, что подобная разрядная система позволит создавать плазму в одинаковых полых катодах с близкими значениями концентрации плазмы.

Распределение температуры электронов (рис. 3, б) в двух полых катодах также практически совпадает. Максимум температуры электронов в этом случае находится ближе к торцу, где расположен анод, и составляет около 5 эВ, а минимум – вблизи торца, где расположена вольфрамовая сетка, и составил около 3 эВ.

Созданная система использовалась для разработки технологических режимов обработки трубчатых изделий из конструкционной стали 40Х. В процессе исследований был оптимизирован режим азотирования. На образце-свидетеле из стали 40Х получено распределение твердости, представленное на рис. 4. Результаты исследований позволили выбрать оптимальный режим азотирования трубчатых изделий.

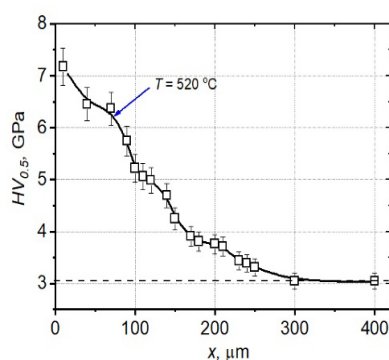


Рис. 4. Распределения микротвердости по глубине азотированных образцов стали 40Х. Режим азотирования: температура – 520 °С, длительность процесса азотирования – 3 часа

Fig. 4. Distribution of microhardness along the depth of nitrided samples of steel 40X. Nitriding mode: temperature – 520 °C, duration of the nitriding process – 3 hours

Выводы

Разработанная двухразрядная система позволяет генерировать плазму как в изогнутом (под углом 90°) полом катоде, так и в полых катодах, расположенных параллельно друг к другу.

Генерация плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде внутри протяженных полых катодах длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм за счет внешней инжекции электронов из плазмы вспомогательного разряда позволяет создавать плазму с концентрацией заряженных частиц до $4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ и обеспечивать степень неоднородности концентрации плазмы до $\pm 23\%$ в случае изогнутого полого катода и до $\pm 35\%$ в случае с полым катодом, состоящим из двух параллельных трубок.

Это позволяет использовать разработанную двухразрядную систему для применения в целях ионно-плазменной обработки внутренней поверхности металлических изделий с большим соотношением длины к диаметру не только для прямых металлических цилиндрических изделий, но и изогнутых, а также создавать однородную плазму со схожими параметрами коэффициента неоднородности концентрации плазмы до $\pm 11\%$ в нескольких изделиях, что позволяет увеличивать количество обрабатываемых деталей за один процесс.

Благодарности / Acknowledgments

Исследования закономерностей горения тлеющего разряда в протяженных цилиндрических трубчатых полых катодах выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Исследования процессов азотирования трубчатых изделий из конструкционной стали 40X производились при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.1.12.

Studies of the burning patterns of the smoldering discharge in long cylindrical tubular hollow cathodes were carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on topic No. FWRM-2022-0001.

Studies of nitriding processes of tubular products made of structural steel 40X were carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 075-15-2021-1348) as part of event No. 3.1.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев Б. И. Разряд с полным катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.
2. Pokorný Z., Kadlec J., Hrubý V., Joska Z., Tran D. Q., Beran D. Plasma nitriding of bored barrels // *Advances in Military Technology*. 2011. V. 6, No. 1. P. 69–75. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KKM.465.267.
3. Borisjuk Yu. V., Mozgrin D. V., Oreshnikova N. M., Berdnikova M. M., Pisarev A. A. Nitriding of internal cylindrical surfaces in abnormal glow discharge // *Journal of Surface Investigation*. 2018. V. 12, Iss. 3. P. 603–606. DOI: 10.1134/S1027451018030254.
4. Braceras I., Ibáñez I., Dominguez-Meister S., Sánchez-García J. A., Brizuela M., Larrañaga A., Garmendia I. Plasma nitriding of the inner surface of stainless steel tubes // *Surface and Coatings Technology*. 2018. V. 355. P. 116–122. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.04.057.
5. Kwon S. C., Park M. J., Baek W. S., Lee G. H. Geometric effect of ion nitriding on the nitride growth behavior in hollow tube // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1992. V. 1, Iss. 3. P. 353–358. DOI: 10.1007/BF02652389.
6. Goncharenko I. M., Oks E. M., Chagin A. A. Inner surface vacuum treatment method. Patent RU No. 2039845 C1. Publ. 20.07.1995.
7. Liu B., Liu C. Z., Cheng D. J., Zhang G., He R., Yang S.-Z. A new method for inner surface modification by plasma source ion implantation (PSII) // *Nucl. Instrum. Methods B*. 2001. V. 184, Iss. 4. P. 644–648. DOI: 10.1016/S0168-583X(01)00823-0.
8. Wang J. L., Zhang G. L., Wang Y. N., Liu Y. F., Yang S. Z. Grid-shadow effect in grid-enhanced plasma source ion implantation // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 192, Iss. 1. P. 101–105. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.069.

9. Li Y., Zheng B. C., Lei M. K. Engineering the tube size for an inner surface modification by plasma-based ion implantation // *Vacuum*. 2012. V. 86, Iss. 9. P. 1278–1283. DOI: 10.1016/j.vacuum.2011.11.014.
10. Bakeev I., Karpov K., Klimov A., Oks E., Zenin A. Focused electron beam transport through a long narrow metal tube at elevated pressures in the forevacuum range // *Plasma Science and Technology*. 2022. V. 25, Iss. 1. Article number 015507. DOI: 10.1088/2058-6272/ac80a7.
11. Burdovitsin V. A., Karpov K. I., Oks E. M. Electron Beam Propagation in a Metal Tube at 1–10-Pa Pressures // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2022. V. 50, Iss. 2. P. 305–309. DOI: 10.1109/TPS.2022.3143902.
12. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. Specific features of focused electron beam transport through a narrow metal tube at negative potential in the forevacuum pressure range // *Vacuum*. 2023. V. 210. Article number 111874. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.111874.
13. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. Operation Features of a Nonself-Sustained Glow Discharge in a Tube Initiated by a Focused Electron Beam in the Forevacuum Pressure Range // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2023. V. 51, Iss. 7. P. 1941–1945. DOI: 10.1109/TPS.2023.3286407.
14. Zenin A. A., Klimov A. S., Burdovitsin V. A., Oks E. M. Generating stationary electron beams by a forevacuum plasma source at pressures up to 100 Pa // *Technical Physics Letters*. 2013. V. 39, Iss. 5. P. 454–456. DOI: 10.1134/s1063785013050271.
15. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. Hollow Cathode Glow Discharge Initiation in a Fore-Vacuum Plasma–Cathode Electron Source // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2022. V. 50, Iss. 12. P. 4860–4864. DOI: 10.1109/TPS.2022.3219051.
16. Zenin A. A., Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M. Suppression of instabilities in the transport of a high-power electron beam in the forevacuum pressure range using low-energy thermionic electrons // *Plasma Sources Science and Technology*. 2021. V. 30, Iss. 12. Article number 125010. DOI: 10.1088/1361-6595/ac3969.
17. Ignatov D. Yu., Lopatin I. V., Denisov V. V., Koval N. N., Ahmadeev Yu. H. Generation of Plasma in Non-Self-Sustained Glow Discharge With Hollow Cathode for Nitriding Inner Surfaces of Elongated and Complex Shaped Cavities // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2020. V. 48, Iss. 6. P. 2050–2059. DOI: 10.1109/TPS.2020.2996739.
18. Ignatov D. Yu., Lopatin I. V., Koval N. N., Denisov V. V. Influence of Parameters of a Non-self-sustaining Glow Discharge with an Elongated Hollow Cathode on the Degree of Inhomogeneity of the Generated Plasma // *IEEE: 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 2020. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242106.
19. Ignatov D. Yu., Kovalsky S. S., Denisov V. V., Lopatin I. V., Koval N. N. Influence of the Discharge Burning Conditions on Distributions of the Parameters of Plasma Generated in a Non-Self-Sustaining Glow Discharge Inside a Hollow Cathode // *Russian Physics Journal*. 2022. V. 64. P. 2170–2176. DOI: 10.1007/s11182-022-02573-w.
20. Игнатов Д. Ю., Денисов В. В., Ковальский С. С. Влияние скорости натекания рабочего газа на распределение концентрации плазмы внутри полого катода несамостоятельного тлеющего разряда // *Conference: 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 2022. P. 767–770. DOI: 10.56761/EFRE2022.C1-P-012101.