

THE PRINCIPLE OF ADDING THE CONCENTRATIONS OF CHARGED PARTICLES IN A BEAM-PLASMA FORMATION FORMED IN A HOLLOW CATHODE OF A NON-SELF-SUSTAINED LOW-PRESSURE GLOW DISCHARGE

Evgeniy Vladimirovich Ostroverkhov^a, Tamara Vasilievna Koval, Yulia Alexandrovna Denisova, Vladimir Viktorovich Denisov, Andrey Alexandrovich Leonov, Sergey Sergeevich Kovalskiy

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

^a evgeniy86evgeniy@mail.ru

ABSTRACT

The regularities of the processes of generation of a beam-plasma formation in a hollow cathode with a volume of about 0.3 m³ of a non-self-sustained low-pressure glow discharge with electron injection from two symmetrically located electron sources have been studied. The paper checks the possibility of applying the principle of algebraic addition of charged particle concentration distributions in a plasma formation, obtained during separate operation of electron sources. An increase in arc discharge currents in electron sources by about 2 times, from 20 to 45 A, which corresponds to an increase in electron injection currents from 9 to 20 A, the accuracy of the addition principle decreases. The maximum degree of inhomogeneity of the concentration of charged particles in the beam-plasma formation during the operation of two sources of electrons with discharge currents of 20 A in the longitudinal direction was 25%, in the radial direction – 52%, the maximum deviation of the inhomogeneity coefficients for the experimental distribution and the distribution obtained as a result of adding data, obtained by separate operation of electron sources, amounted to 8%. The results of the study make it possible to use the principle of addition to predict the concentration distributions of charged particles in beam-plasma formations formed in large-volume hollow cathodes in a non-self-sustaining low-pressure glow discharge, and are of practical value for designing and creating equipment for hardening the surface of materials and products.

KEYWORDS

Glow discharge; hollow cathode; electron source; distribution of plasma parameters; plasma.

ПРИНЦИП СЛОЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ОБРАЗОВАНИИ, СФОРМИРОВАННОМ В ПОЛОМ КАТОДЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Евгений Владимирович Островерхов^а, Тамара Васильевна Коваль, Юлия Александровна Денисова, Владимир Викторovich Денисов, Андрей Александрович Леонов, Сергей Сергеевич Ковальский

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

^a evgeniy86evgeniy@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Проведено исследование закономерностей процессов генерации пучково-плазменного образования в полем катоде объемом около $0,3 \text{ м}^3$ несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инъекцией электронов из двух симметрично расположенных источников электронов. В работе проверяется возможность применения принципа алгебраического сложения распределений концентрации заряженных частиц в плазменном образовании, полученных при отдельной работе источников электронов. Полученные распределения параметров плазмы при токах дугового разряда 20 и 45 А и при токах тлеющего разряда до 200 А свидетельствуют, что при повышении токов дуговых разрядов в источниках электронов примерно в 2 раза, с 20 до 45 А, что соответствует увеличению токов инъекции электронов с 9 до 20 А, точность выполнения принципа сложения снижается. Максимальная степень неоднородности концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании при работе двух источников электронов с разрядными токами 20 А в продольном направлении составила 25%, в радиальном – 52%, максимальное отклонение коэффициентов неоднородности для экспериментального распределения и распределения, полученного в результате сложения данных, полученных при раздельной работе источников электронов, составила 8%. Результаты исследования позволяют использовать принцип сложения для прогнозирования распределений концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях, формируемых в полых катодах большого объема в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления, и имеют практическую ценность для проектирования и создания оборудования для упрочнения поверхности материалов и изделий. В созданной системе генерации пучково-плазменных образований определены оптимальные режимы азотирования тяжело нагруженных пуансонов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Тлеющий разряд; полый катод; источник электронов; распределение параметров плазмы; концентрация плазмы.

Введение

Ионно-плазменные методы обработки поверхности металлов и сплавов широко применяются в современной промышленности с целью азотирования, активации поверхности и нанесения износостойких покрытий. Ионно-плазменные химико-термические методы упрочнения поверхности крупногабаритных протяженных изделий из металлов и сплавов благодаря высокой экологичности имеют ряд преимуществ перед газовыми методами. Однако создание таких систем имеет ряд сложностей, в частности должны быть решены вопросы обеспечения низкой степени неоднородности заряженных частиц по объему рабочей камеры, что необходимо для равномерной обработки поверхности изделий. В используемой нами электродной системе

для зажигания основного несамостоятельного сильноточного тлеющего разряда низкого давления в полем катоде большой площади используется инъекция электронов из вспомогательного дугового разряда через сеточный многоконусный электрод. Неравномерность обработки протяженных изделий связана с конструкцией электродной системы, в которой, как правило, инъекция заряженных частиц происходит через локальную область поверхности полого катода, что создает неравномерность распределения извлекаемых частиц и неравномерность распределения, генерируемого в тлеющем разряде пучково-плазменного образования. Применение нескольких инжекторов заряженных частиц в системе с несамостоятельным тлеющим разрядом с полем катодом большой

площади позволяет снизить неоднородность, однако прогнозирование результирующего распределения становится затруднительным [1]. В предлагаемой электродной системе имеется возможность независимой регулировки тока и напряжения горения тлеющего разряда, рабочего давления в вакуумной камере, а также горения несамостоятельного тлеющего разряда в импульсном режиме, что позволят получить концентрацию плазмы на порядок выше по сравнению с самостоятельным тлеющим разрядом [2, 3]. При проектировании крупногабаритных систем требуется спрогнозировать распределение плазмы в объеме рабочей камеры. В случае проектирования и создания систем, в которых используются два и более источника электронов требуется предварительное прогнозирование распределения концентрации плазмы в полном катоде.

В данной работе исследуется возможность применения принципа сложения для прогнозирования распределения концентрации плазмы в полном катоде сильнооточного тлеющего разряда низкого давления с двумя источниками электронов. Под принципом сложения понимается соблюдение равенства экспериментально полученного распределения концентрации плазмы в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда при совместной работе двух и более источников электронов и алгебраической суммы распределений концентрации плазмы, полученных при отдельной работе источников электронов.

1. Описание экспериментальной установки

Проверка возможности применения принципа сложения проводилась на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1. Вакуумная камера была изготовлена в виде полого цилиндра диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и объемом 0,34 м³. Основной несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между полым катодом, роль

которого выполняли стенки вакуумной камеры, и разнесенным кольцевым анодом. Для стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда использовались источники электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом. Вспомогательный дуговой разряд в каждом из источников электронов зажигался между полым катодом и конусным сеточным электродом, который являлся анодом вспомогательного дугового разряда и находился под потенциалом камеры. Электроны, эмитированные через конусный сеточный электрод, осциллировали в полном катоде тлеющего разряда и производили ионизацию газа. Источники электронов располагались соосно напротив друг друга на продольной оси вакуумной камеры. Ввиду особенностей вакуумной камеры и ее крепления к станине источники электронов имеют некоторую несимметричность. Определение концентрации плазмы проводилось зондовым методом с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра. Для измерения зондовых характеристик в камеру вводился цилиндрический зонд диаметром 0,8 мм и длиной 4,5 мм. Зонд перемещался вдоль продольной оси вакуумной камеры с шагом 200 мм поочередно на расстоянии $R = 0, 130$ и 260 мм от продольной оси вакуумной камеры.

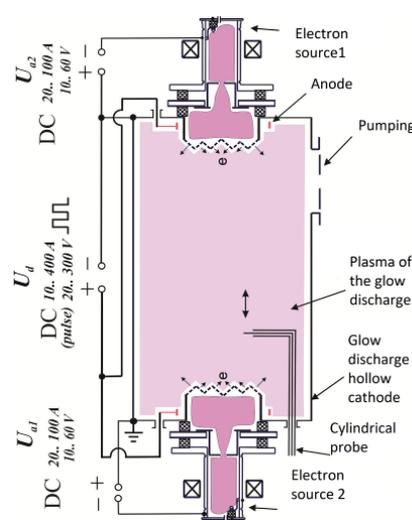


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental installation

Для сравнения экспериментально полученных величин длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} и распределений параметров плазмы (температуры электронов (T_e), потенциала плазмы (ϕ); концентрации плазмы (N)) с расчетными используются коэффициенты неоднородности $k_{\lambda_{ei}}$, k_{T_e} , k_{ϕ} , k_N соответственно. Коэффициент неоднородности k равен максимальному отклонению величины параметра плазмы от среднего значения, деленному на его среднее значение.

$$k = \frac{|N_n - N_{cp}|_{\max}}{N_{cp}} \times 100\%, \quad (1)$$

где N_n – значение величины концентрации плазмы в n -ой точке пространства с заданными координатами, N_{cp} – среднее арифметическое значение концентрации плазмы в заданных точках пространства. Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} рассчитывалась по формуле

$$\lambda_{ei} = \frac{1}{N \cdot \delta_k}, \quad (2)$$

где N – концентрация плазмы, δ_k – сечение кулоновского взаимодействия [6].

Чем коэффициент неоднородности ниже, тем распределение более равномерное. Исследования характеристик тлеющего разряда проводились в импульсном режиме горения разряда в квазистационарном режиме горения. Поскольку время фронта разрядного импульса составляло для различных напряжений горения и мощности в разряде до 2 мс, то все характеристики разряда и измерения параметров плазмы проводились на третьей миллисекунде разрядного импульса при частоте следования импульсов $f = 38$ Гц с коэффициентом заполнения $\gamma = 13\%$.

Перед началом эксперимента вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па, затем напускался азот особой чистоты до требуемого

давления. В ранее проведенных работах исследовалось влияние формы и расположения анода тлеющего разряда на распределение плотности ионного тока [4, 5]. В результате исследований было показано, что наиболее оптимальными для анода являются форма кольца и расположение его в области геометрической тени для инжектируемых электронов. Важную роль играет так же и симметричность электродной системы. Поэтому целесообразно разделить анод на две части и расположить их симметрично относительно инжекторов электронов. Во всех экспериментах давление рабочего газа азота составляло 0,6 Па, напряжение горения тлеющего разряда составляло 160 В, токи дугового разряда составляли 20 А.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Применимость принципа сложения во многом определяется линейностью системы, то есть в первую очередь линейной зависимостью тока основного тлеющего разряда от тока инжекции. В ходе экспериментов были получены эмиссионные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда в импульсно-периодическом и постоянном режимах горения (рис. 2, 3). На эмиссионных характеристиках несамостоятельного тлеющего разряда, полученных как в импульсном, так и в постоянном режимах, зависимости для случаев раздельной работы источников электронов накладываются друг на друга. Что говорит об одинаковой эмиссионной способности каждого источника электронов в отдельности. Зависимости тока дугового разряда от тока несамостоятельного тлеющего разряда при раздельной и совместной работе источников электронов носят линейный характер. Суммарные значения, полученные при сложении значений точек, полученных при раздельной работе источников электронов (зависимость 4), с точностью до 15% совпадают с экспериментальными.

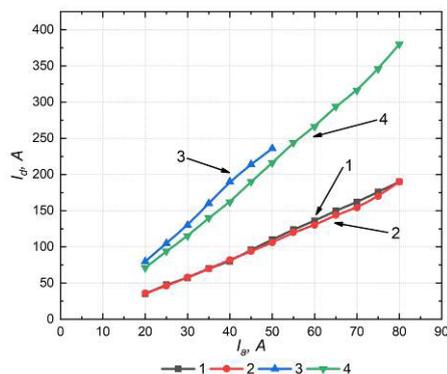


Рис. 2. Эмиссионные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в импульсном режиме:
 1 – источник электронов №1; 2 – источник электронов №2; 3 – совместное включение источников электронов; 4 – расчетное распределение

Fig. 2. Emission characteristics of a non-self-sustaining glow discharge obtained in a pulsed mode:
 1 – electron source No. 1; 2 – electron source No. 2; 3 – both electron sources are switched on; 4 – calculated distribution

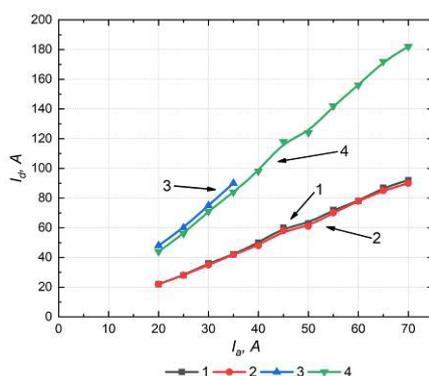


Рис. 3. Эмиссионные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, полученные в постоянном режиме:
 1 – источник электронов №1; 2 – источник электронов №2; 3 – совместное включение источников электронов; 4 – расчетное распределение

Fig. 3. Emission characteristics of a non-self-sustained glow discharge obtained in a constant mode:
 1 – electron source No. 1; 2 – electron source No. 2; 3 – both electron sources are switched on; 4 – calculated distribution

Минимальный ток вспомогательного дугового разряда, при котором стабильно горит основной тлеющий разряд равен 20 А. Необходимо отметить, что ток инжекции в плазму тлеющего разряда с учетом прозрачности сетчатого эмиссионного электрода (45%) составляет 9 А. В ходе эксперимента сначала включали источник электронов №1 и получали продольное распределение концентрации плазмы N . Затем источник элек-

тронов №1 выключали и включали источник электронов №2 и так же получали продольное распределение концентрации плазмы от источника электронов №2. Затем оба источника электронов включали совместно. Далее значения, полученные в одинаковых координатах при раздельной работе источников электронов, складывались и получалось суммарное распределение. Для наглядности распределение концентрации плазмы построено

в виде карты распределения, представленной на рис. 4. Карта распределения концентрации плазмы в полном катоде была построена по имеющимся экспериментальным данным путем интерполяции по радиусу и экстраполяции по длине протяженного полого катода. Распределение концентрации плазмы (рис. 4) получено при токе дугового разряда 20 А в источнике электронов №1 (режим 1).

На рис. 5 представлено распределение концентрации плазмы при включении источника электронов №2, при токе дугового разряда 20 А (режим 2).

Распределения имеют схожий характер, максимум концентрации плазмы вблизи источника инжекции электронов и дальнейшее уменьшение в продольном и радиальном направлениях. На рис. 6 представлено распределение концентрации плазмы при совместном включении источников электронов №1 и №2, при токах дугового разряда 20 А (режим 3).

При совместном включении источников электронов, распределение плазмы в полном катоде становится более равномерным. На рис. 7 представлено суммарное распределение концентрации плазмы при токах дугового разряда 20 А (режим 4).

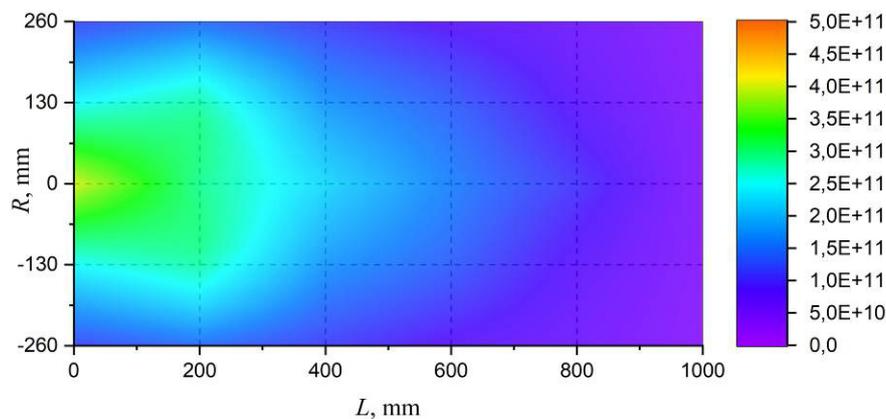


Рис. 4. Распределение концентрации плазмы при включении источника электронов №1, при токе дугового разряда 20 А (режим 1)

Fig. 4. Distribution of plasma concentration when the electron source No. 1 is switched on, at 20 A arc current (mode 1)

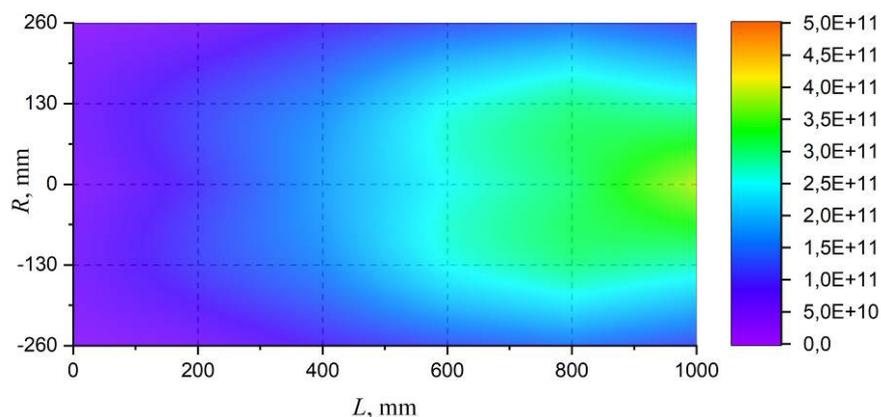


Рис 5. Распределение концентрации плазмы при включении источника электронов №2, при токе дугового разряда 20 А (режим 2)

Fig. 5. Distribution of plasma concentration when electron source No. 2 is switched on, at an arc discharge current of 20 A (mode 2)

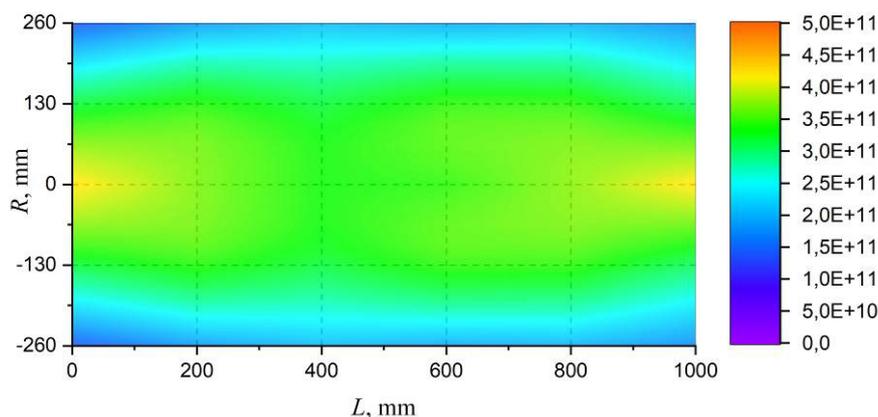


Рис. 6. Распределение концентрации плазмы при совместном включении источников электронов №1 и №2, при токах дугового разряда 20 А (режим 3)

Fig. 6. Distribution of plasma concentration when electron sources No. 1 and No. 2 are switched on together, at arc discharge currents of 20 A (mode 3)

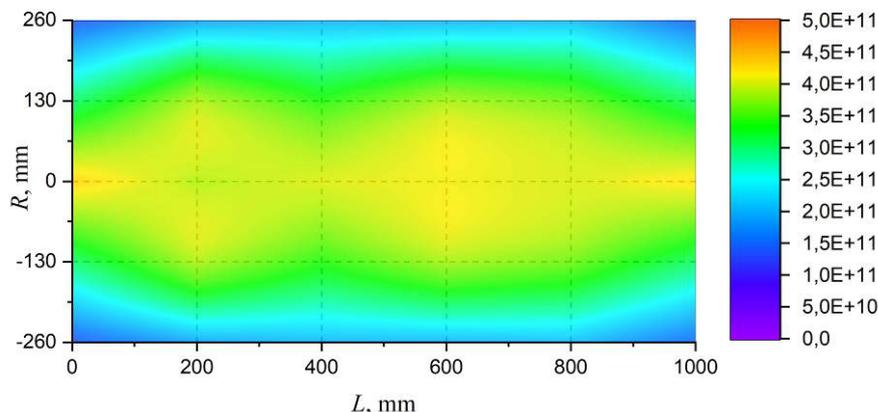


Рис. 7. Суммарное распределение концентрации плазмы при токах дугового разряда 20 А (режим 4)

Fig. 7. Total distribution of plasma concentration at arc discharge currents of 20 A (mode 4)

Суммарное распределение идентично по форме с экспериментальным. Для сравнения между собой полученных распределений концентрации плазмы при токах дугового

разряда 20 А в продольном и радиальном направлениях были рассчитаны коэффициенты неоднородности плазмы k_N для каждой точки снятия данных.

Таблица 1. Радиальное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

Table 1. Radial distribution of the plasma density inhomogeneity coefficient k_N

	0 mm	200 mm	400 mm	600 mm	800 mm	1000 mm
режим 1 / mode 1	63%	42%	34%	39%	39%	11%
режим 2 / mode 2	49%	53%	39%	44%	42%	53%
режим 3 / mode 3	52%	40%	29%	37%	37%	43%
режим 4 / mode 4	52%	45%	37%	42%	38%	48%

Таблица 2. Продольное распределение коэффициента неоднородности концентрации плазмы k_N

Table 2. Longitudinal distribution of the plasma density inhomogeneity coefficient k_N

R, mm	режим 1/ mode 1	режим 2/ mode 2	режим 3/ mode 3	режим 4/ mode 4
0	100%	87%	14%	6%
130	80%	74%	8%	15%
260	70%	79%	25%	26%

Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для режимов 3 и 4 составляет 20% и наблюдается на продольной оси полого катода.

Система генерации пучково-плазменного образования использовалась для исследований процессов химико-термической обработки (азотирования) поверхности детали штампа – пуансона из стали X12МФ, представленного на рис. 8, с целью упрочнения поверхности данного изделия и разработки оптимального технологического режима обработки с последующим включением в технологический цикл производства. В ходе проведенных исследований был разработан режим азотирования, при котором толщина азотированного слоя стального пуансона составляла более 70 мкм (рис. 9). Значения твердости азотированного слоя составили около 12 ГПа, что более чем на 50% выше

значений твердости пуансона до азотирования. Кроме того, разработанный режим азотирования пуансона практически не приводил к отпуску стали пуансона, значения твердости в объеме были чуть ниже, чем значения твердости исходного пуансона (рис. 9).



Рис. 8. Внешний вид пуансона

Fig. 8. Appearance of the punch

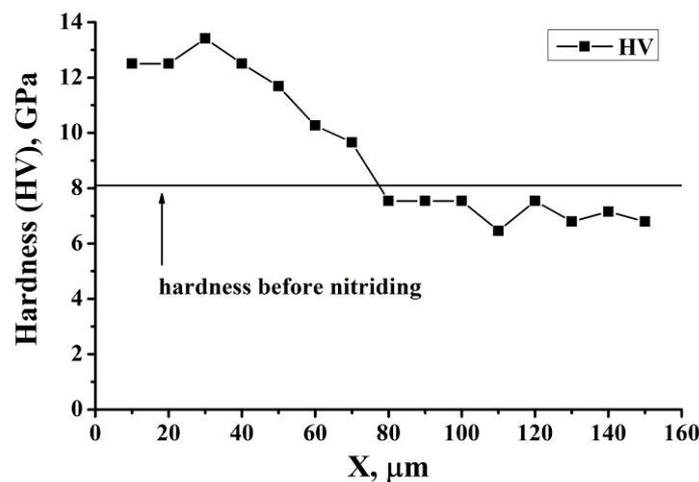


Рис. 9. Распределение твердости по глубине азотированного слоя пуансона. Температура азотирования 455 °С, время процесса 10 ч

Fig. 9. Distribution of hardness over the depth of the nitrided layer of the punch. Nitriding temperature 455 °C, processing time 10h

Выводы

В осесимметричной цилиндрической системе генерации плазмы на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов из двух источников электронов, расположенных на верхнем и нижнем основаниях полого катода, с высокой точностью действует принцип сложения. Отклонение экспериментальных характеристик и полученных в результате арифметического сложения составляют не более 15% для импульсного режима горения и не более 10% для постоянного режима.

При исследовании распределений концентраций плазмы показано, что для исследуемой системы при токах тлеющего разряда до 200 А принцип сложения распределений концентрации плазмы реализуется со степенью точности не хуже 26%.

При включении двух источников электронов с токами 20 А максимальная неоднородность в продольном направлении составила 25%, в радиальном 52%, максимальное отклонение коэффициентов неоднородности 8%. Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для эксперимента и распределения, полученного в результате сложения распределений, полученных при отдельной работе источников электронов, составляет 20% и наблюдается на продольной оси полого катода.

С использованием созданной системы генерации пучково-плазменного образования определены оптимальные режимы ионно-плазменного азотирования поверхности детали штампа – пуансона из стали Х12МФ. В результате цикла исследований определены оптимальные режимы ионно-плазменной обработки промышленно-выпускаемых пуансонов, позволяющие достигать значений твердости на поверхности материала 12 ГПа, глубины азотированного слоя около 70 мкм и твердости в объеме материала около 7 ГПа, что удовлетворяет заданным требованиям.

Благодарности / Acknowledgments

Исследования возможности применения принципа сложения распределения концентрации плазмы в полом катоде сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя источниками электронов выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Исследования процессов упрочнения поверхности тяжело нагруженных пуансонов производились при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.1.12.

Research on the possibility of applying the principle of addition of the plasma concentration distribution in a hollow cathode of low-pressure current-intensive glow discharge with two electron sources was performed in the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under theme No. FWRM-2022-0001.

Research on the processes of surface hardening of heavily loaded punches was performed with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 075-15-2021-1348) in the framework of activity No. 3.1.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шандриков М. В. Генераторы низкотемпературной плазмы на основе разряда низкого давления на основе разряда низкого давления с инжекцией электронов из дугового контрагированного разряда: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2004. 146 с.
2. Щанин П. М., Коваль Н. Н., Ахмадеев Ю. А., Григорьев С. В. Дуговой разряд с холодным полым катодом в скрещенных электрическом и магнитном полях // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 5. С. 24–29.
3. Лопатин И. В., Ахмадеев Ю. Х., Коваль Н. Н., Щанин П. М. Генератор плазмы на основе несамосто-

ятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 151–156.

4. Денисов В. В., Воробьев М. С., Коваль Н. Н., Ковальский С. С., Лопатин И. В., Островерхов Е. В. Режимы горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом при повышенных значениях токов // Изв. ВУЗов Физика. 2017. Т. 60, № 10/2. С. 39–43.

5. Денисов В. В., Коваль Н. Н., Денисова Ю. А., Лопатин И. В., Островерхов Е. В. Влияние анода несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом на пространственное распределение концентрации плазмы // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 7. С. 46–52. DOI: 10.17223/00213411/62/7/47.

6. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М: Наука, 1982. 375 с.