

**ESTIMATION AND CALCULATION OF PARAMETERS  
OF GENERATION SYSTEMS OF BEAM-PLASMA FORMATIONS SYNTHESIZED  
IN A HIGH-CURRENT NON-SELF-SUSTAINED GLOW DISCHARGE  
WITH HOLLOW CATHODE**

*Vladimir Viktorovich Denisov<sup>a</sup>, Nikolay Nikolaevich Koval*

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

<sup>a</sup> denisov@opee.hcei.tsc.ru

---

**ABSTRACT**

The report presents methods for estimation and calculation of parameters of systems generating beam-plasma formations (BPF) for technological use in ion-plasma surface treatment of construction and tool materials. The main quantitative parameters that provide the required operational parameters and characteristics of the created plasma sources and electron-ion-plasma equipment as a whole are the concentration of gas-discharge plasma, as well as the ion current and electron current densities associated with it. It is convenient to calculate the systems for generating BPF used for technological purposes of processing the surface of materials and products based on the required value of the current density of ions accelerated to the surface of the processed products. Schemes and designs of experimental prototypes of systems for generating BPF based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a low-pressure hollow cathode, calculated and created on the basis of the methods presented in the report, are described.

**KEYWORDS**

Beam-plasma formation; high-current glow discharge with hollow cathode; ion current density; ion-plasma treatment.

**ОЦЕНКА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ  
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ  
В СИЛЬНОТОЧНОМ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ  
С ПОЛЫМ КАТОДОМ**

*Владимир Викторович Денисов<sup>a</sup>, Николай Николаевич Коваль*

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

<sup>a</sup> denisov@opee.hcei.tsc.ru

---

**АННОТАЦИЯ**

В работе представлены методы оценки и расчета параметров систем генерации пучково-плазменных образований (ППО) для технологического использования в процессах ионно-плаз-

менной обработки поверхности конструкционных и инструментальных материалов. Основными количественными параметрами, обеспечивающими необходимые эксплуатационные параметры и характеристики создаваемых источников плазмы и электронно-ионно-плазменного оборудования в целом, являются концентрация газоразрядной плазмы, а также связанные с ней плотность ионного тока и плотность электронного тока. Системы генерации пучково-плазменных образований, используемые в технологических целях обработки поверхности материалов и изделий, удобно рассчитывать исходя из требуемого значения плотности тока ионов, ускоряемых к поверхности обрабатываемых изделий. В работе представлены схемы и конструкции экспериментальных образцов систем генерации пучково-плазменных образований (ППО) на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом низкого давления, рассчитанные и созданные на основе описанной методики расчета.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Пучково-плазменное образование; сильноточный тлеющий разряд с полым катодом; плотность ионного тока; ионно-плазменная обработка.

### Введение

Ионно-плазменные методы модификации поверхности изделий, в которых обрабатываемое изделие погружается в плазму и находится под потенциалом одного из электродов разряда или под дополнительным электрическим смещением для обеспечения тока положительных или отрицательных частиц на поверхность, наиболее перспективны среди других методов ввиду своей экологичности и высокой эффективности обработки.

Одним из наиболее перспективных с точки зрения генерации однородных плазменных образований в больших вакуумных объемах является тлеющий разряд низкого, около 1 Па, давления с полым катодом, в котором осуществляется электростатическое удержание электронов, ускоренных в прикатодном падении потенциала [1–4]. Генерация этих электронов, как правило, происходит в результате процессов вторичной ионно-электронной эмиссии на стенках полого катода. В случае, когда для стабильного зажигания и горения тлеющего разряда при низких напряжениях горения (50–300 В) используется инжекция электронов из дополнительного источника [5–9], свойства плазменного образования (величина концентрации заряжен-

ных частиц, распределение параметров плазмы по объему полого катода, состав плазмы) определяются параметрами пучка инжектируемых электронов (плотность электронного тока, энергия электронов), откуда и характерное название «пучково-плазменное образование» (далее ППО). Результаты исследований таких пучково-плазменных образований [10, 11] свидетельствуют об высоком потенциале их использования в процессах ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий. Во многом это обусловлено относительно высокой (0,1–1%) степенью ионизации и низкой степенью неоднородности концентрации заряженных частиц в полой катоде, которая может составлять  $\pm 20\%$  в объеме более 0,2 м<sup>3</sup>. Благодаря инжекции из вспомогательного источника плазмы пучка энергетичных электронов, ускоренных в слое катодного падения потенциала, и последующей утилизации их энергии в многочисленных столкновениях в объеме полого катода, основная вольт-амперная характеристика сильноточного, до нескольких сотен ампер, несамостоятельного тлеющего разряда при таких условиях приближается к вольт-амперной характеристике дугового разряда низкого давления с катодным пятном (рис. 1).

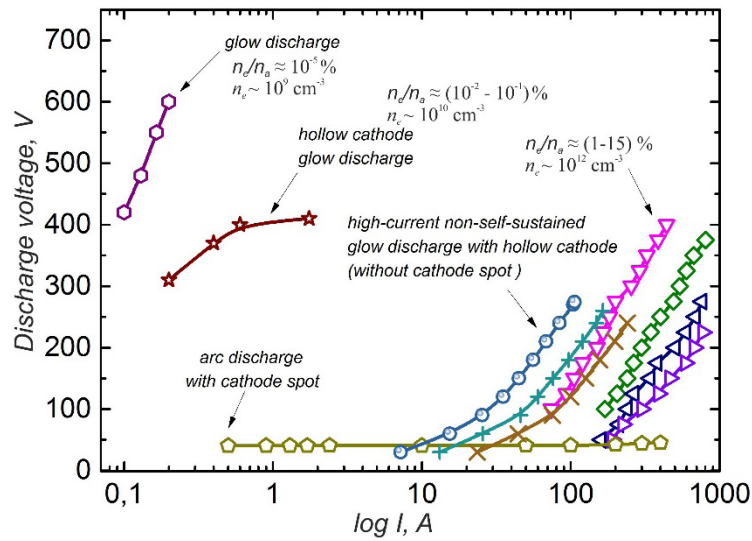


Рис.1. Вольтамперные характеристики дугового и тлеющих разрядов в области рабочих давлений ( $10^{-3}$ – $10^3$ ) Па

Fig. 1. Volt-ampere characteristics of arc and glow discharges in the range of operating pressures ( $10^{-3}$ – $10^3$ ) Pa

До недавнего времени создание систем генерации пучково-плазменных образований вызывало сложности ввиду отсутствия информации об особенностях работы при высоких, до нескольких сотен ампер, токах и возможности достижения требуемой однородности концентрации заряженных частиц в объеме полого катода. Цикл исследований, проведенных в последние годы, позволил сформировать понимание основных закономерностей влияния различных параметров на свойства пучково-плазменных образований и на этой основе разработать методику оценки и расчета основных параметров систем генерации газовых ППО для технологического использования в процессах ионно-плазменной обработки поверхности материалов.

Основными количественными параметрами, обеспечивающими требуемые эксплуатационные параметры и характеристики создаваемых источников плазмы и электронно-ионно-плазменного оборудования в целом, являются концентрация газоразрядной плазмы, а также связанные с ней плотности ионного тока и электронного тока. Расчет систем генерации технологических пучково-плазменных образований, используемых для целей обработки поверхности материалов и

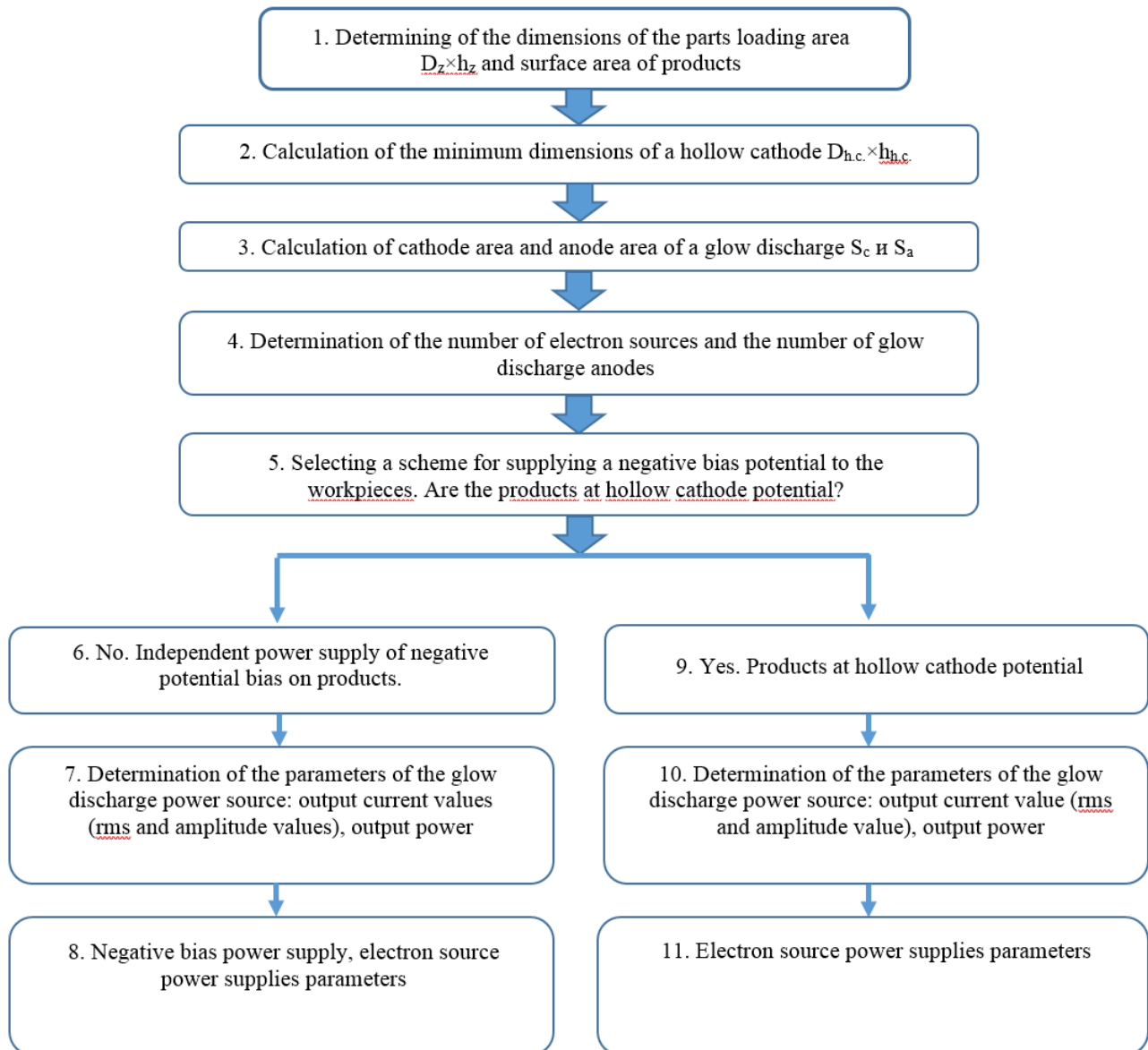
изделий, целесообразно производить на основе требуемого значения плотности тока ионов, ускоренных на поверхность обрабатываемых изделий.

В работе представлена рабочая методика оценки и расчета параметров систем генерации пучково-плазменных образований для технологического использования в процессах ионно-плазменной обработки поверхности конструкционных и инструментальных материалов.

### 1. Методика расчета геометрических параметров системы генерации пучково-плазменного образования и параметров систем электропитания

Обобщенный алгоритм расчета геометрических параметров системы генерации пучково-плазменного образования в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рис. 2.

В процессе расчета геометрических параметров системы генерации пучково-плазменного образования в качестве исходных данных используются следующие: средняя плотность ионного тока  $j_{i,cp}$ , требуемые геометрические параметры рабочей зоны для размещения изделий – диаметр  $D$  (м) и высота рабочей зоны  $h$  (м).



**Рис. 2.** Блок-схема обобщенной методики расчета геометрических параметров системы генерации пучково-плазменного образования в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда и параметров систем электропитания

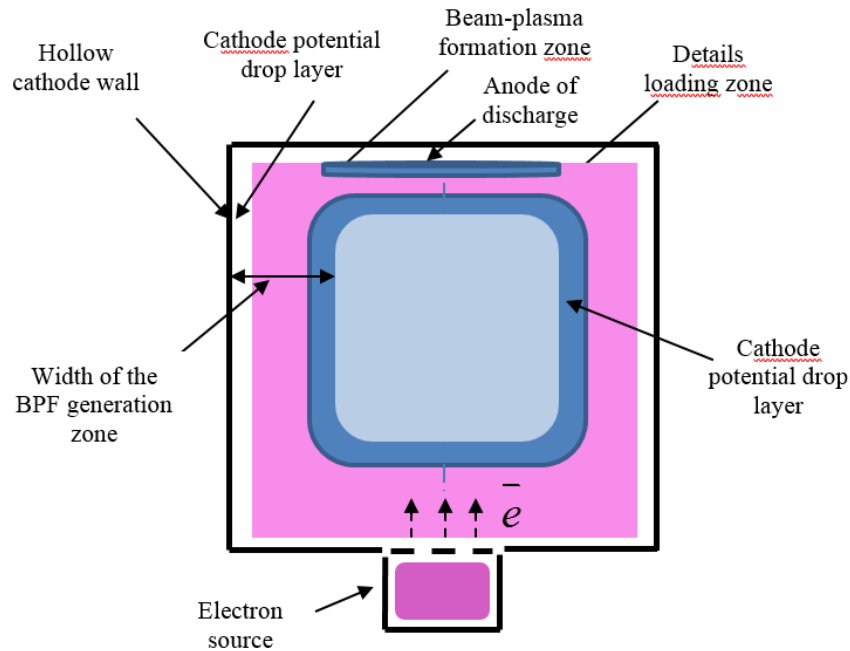
**Fig. 2.** A scheme of generalized algorithm for calculating the geometric parameters of the system for generating a beam-plasma formation in a hollow cathode of a non-self-sustained glow discharge and the parameters of power supply systems

Последовательность шагов по расчету геометрических параметров системы генерации пучково-плазменного образования можно представить следующим образом:

1. Определение внутренних размеров полого катода. В расчетах принимается, что стенки полого катода изготовлены из немаг-

нитной аустенитной нержавеющей стали, например марки 12X18H10T.

Исходя из заданных значений диаметра  $D_z$  (м) и высоты  $h_z$  (м) зоны загрузки деталей (рис. 3) определяются геометрические параметры полого катода.



**Рис. 3.** Схема системы генерации ППО (к пояснению методики расчета системы генерации газового ППО для реализации технологических процессов обработки поверхности)

**Fig. 3.** Scheme of the BPF generation system (to the explanation of the methodology for calculating the system of generation of gaseous PPO for the implementation of technological processes of surface treatment)

Оценочная площадь поверхности изделий, если иное не обговаривается, определяется как

$$S_{\text{изд}} = \pi \cdot D_3 \cdot h_3 + 2 \pi \cdot D_3^2 / 4. \quad (1)$$

Для эффективной генерации плазменного образования и обеспечения низкой степени неоднородности распределения плотности ионного тока по поверхности деталей, расположенных в зоне загрузки, необходимо обеспечить пространство для осцилляции инжектированных из источника(ов) электронов, ускоренных в прикатодном падении потенциала. Минимальная ширина  $d_{\text{ген}}$  зоны генерации ППО между зоной загрузки деталей и поверхностью стенок полого катода должна составлять 15 см (рис. 3). Данная величина определена экспериментально и позволяет проводить однородную обработку поверхности изделий из конструкционных и инструментальных материалов в широком диапазоне температур изделия (400–800 °С) одновременно как в стационарном режиме

горения (коэффициент заполнения разрядного импульса 100%), так и в импульсно-периодическом режиме горения разряда. При меньших значениях ширины зоны генерации ППО при низких температурах обработки изделий значения концентрации плазмы относительно низкие и возможно перекрытие слоев прикатодного падения потенциала, примыкающих к стенкам полого катода и изделия.

Таким образом, минимальный внутренний диаметр цилиндрического полого катода будет равен  $D_{\text{н.к.мин}} = D_3 + 2 \cdot d_{\text{ген}}$ , а минимальная высота  $h_{\text{н.к.мин}} = h_3 + 2 \cdot d_{\text{ген}}$ .

2. Следующим шагом после определения минимальных внутренних габаритных размеров полого катода является расчет необходимой площади полого катода, исходя из геометрии полого катода. Для цилиндрического полого катода его площадь рассчитывается из формулы:

$$S_{\text{к}} = \pi \cdot D_{\text{н.к.мин}} \cdot h_{\text{н.к.мин}} + 2 \cdot \pi \cdot (D_{\text{н.к.мин}} / 2)^2. \quad (2)$$



3. Площадь анода определяется как  $S_{a\_min} = S_k (2m_e/M_i)^{1/2} \cdot (1+1/N)$ , где  $N = I_{ic}/I_e$  – среднее количество ионов, генерируемых в плазме, на один электрон, эмитированный из плазмы вспомогательного разряда, или, другими словами, среднее количество ионизаций, проведенных электроном, инжектированным или появившимся в результате процесса кинетической ионно-электронной эмиссии и ускоренным в прикатодном падении потенциала [12].  $N$  также можно определить исходя из выражения  $N = U_d/W_i$ , где  $W_i$  – потенциал ионизации молекул рабочего газа,  $U_d$  – напряжение горения разряда. Результаты экспериментов показывают, что для полых катодов с характерным размером поперечной или продольной длины до 2 м напряжение горения разряда необходимо устанавливать на уровне  $U_{d\_min} = 300$  В. Значительное повышение значения напряжения горения разряда приводит к значительно большему травлению поверхности стенок полого катода, а снижение – к повышению степени неоднородности распределения концентрации ионов в пучково-плазменном образовании. При  $W_i(N_2) = 31,2$  эВ [13] и принятой величине  $U_{d\_min} = 300$  В,  $N = eU_d/W_i = 300 \text{ эВ} / 31,2 \text{ эВ} \approx 9,6$ , и необходимо рассчитывать площадь анода как

$$S_{a\_min} \approx S_k 1,1 (2m_e/M_i)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $M_i$  – средняя масса иона.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что стабильное горение тлеющего разряда обеспечивается при увеличении значения площади анода  $S_{a\_min}$ , рассчитанного по формуле 2, примерно в 2 раза. На практике применение данной операции удвоения площади анода целесообразно ввиду минимального влияния на увеличение степени неоднородности концентрации заряженных частиц и значительного увеличения стабильности горения разряда при низких напряжениях горения.

Выполнение этого условия при рабочих давлениях ниже 1 Па при концентрации ионов более  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  и напряжениях горения до нескольких сотен вольт позволяет с высокой точностью определять энергию ионов, бомбардирующих поверхность изделий, из выражения

$$E_i \approx e \cdot (U_d + \Delta U) = e \cdot (U_d + \Delta U), \quad (4)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $U_d$  – напряжение горения разряда (между анодом и катодом тлеющего разряда),  $\Delta U = \Phi_{пл} - \Phi_a$ ,  $\Phi_{пл}$  – потенциал плазмы,  $\Phi_a$  – потенциал анода. Для пояснения смысла величин на рис. 4 представлено распределение электрического потенциала в разрядном промежутке.

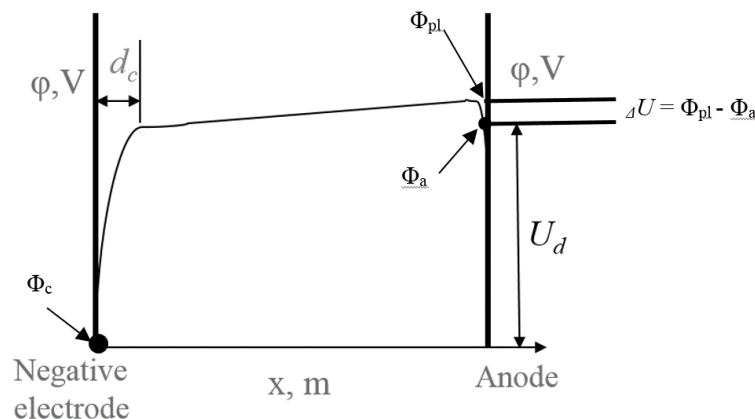


Рис. 4. К пояснению алгоритма расчета системы генерации газового ППО для реализации технологических процессов обработки поверхности

Fig. 4. To the explanation of the algorithm for calculating the system of generation of gaseous BPF for the implementation of technological processes of surface treatment

4. Оценку необходимости использования двух и более источников электронов [14] для плоской или клинообразной геометрии эмиссионного электрода [15] необходимо производить из двух критериев, включающих достижение определенной величины объема полого катода и величины отношения диаметра к длине полого катода. Вместо диаметра полого катода может использоваться характерный поперечный размер полого катода.

Условия использования двух и более источников электронов на основе экспериментальных данных с учетом оптимального номинального значения напряжения горения разряда  $U_d = 300$  В выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} V_{н.к.} > 0,2 \text{ м}^3 \\ D_{н.к.} < 1,5 h_{н.к.} \end{cases} \quad (5)$$

Численные значения в условиях (5) определены на основе экспериментальных результатов и опыта использования газовых ППО в полых катодах разного размера для обработки поверхности изделий. Оценка по данным критериям позволяет создавать системы, обеспечивающие степень неоднородности концентрации ионов до нескольких десятков процентов по объему вакуумной камеры, что достаточно для реализации однородной обработки изделий в газовом пучково-плазменном образовании.

В объемах полого катода менее  $0,2 \text{ м}^3$  реализуется возможность создания плазмы с низкой степенью неоднородности при варьировании напряжения горения разряда, рабочего давления и тока инжекции с использованием одного источника электронов.

Результаты исследований однородности газового пучково-плазменного образования в протяженном полом катоде свидетельствуют, что при использовании одного источника электронов на высоте около 75 см при поперечном расстоянии между экранами около 50 см возникает неоднородность концентрации газовых ионов более нескольких десятков процентов, что затрудняет реализацию

технологических циклов обработки изделий с большими массогабаритными параметрами и сложной геометрии [16].

Если для генерации ППО используется два или более источника электронов, то целесообразно использование анода, разделенного на две или более (по количеству источников электронов), части, как правило равные, которые установлены вблизи эмиссионных сеток в области геометрической тени по отношению к траекториям электронов, эмитируемых с поверхности сетчатого электрода.

5. В блоке 5 методики расчета (рис. 2) параметров системы генерации ППО необходимо произвести выбор схемы подвода отрицательного потенциала смещения на обрабатываемые изделия. В случае подключения изделий к потенциалу полого катода, происходит переход на блок 9 и следующие за ним блоки 10 и 11 методики. Если же используется независимый источник электропитания отрицательного потенциала смещения, то происходит переход к блоку 6 и следующие за ним блоки 7 и 8. Изделия, располагаемые в садке и обрабатываемые в газовом ППО, подвергаются бомбардировке ионов из плазмы. Управление энергией ионов осуществляется путем подачи на изделия электрического потенциала, отрицательного относительно анода. Для изделий с большими массогабаритными параметрами в ряде случаев нецелесообразно использование отдельных систем электропитания, а технология позволяет работать в узком диапазоне напряжений горения разряда, позволяющих создавать удовлетворительную степень неоднородности концентрации ионов в полом катоде. В этом случае изделия устанавливаются на дно или подвешиваются в полом катоде установки. Происходит переход на правую ветвь алгоритма – к блокам 9, 10 и 11, в ином случае – к левой ветви методики с блоками 6, 7 и 8.

6. Необходимо отметить, что наиболее полные возможности для обработки в пучково-плазменном образовании поверхности широчайшего круга материалов и круга из-

делий предоставляет система, в которой используется отдельный источник электропитания отрицательного потенциала смещения. В этом случае независимо регулируется отрицательный потенциал смещения на изделии, а следовательно и энергия бомбардирующих ионов. Остальные рабочие параметры процесса обработки также могут независимо изменяться. По умолчанию рекомендуется использовать отдельный источник отрицательного потенциала смещения.

7. При использовании отдельного источника электропитания отрицательного потенциала смещения, требования к мощности и величине выходного тока источника электропитания тлеющего разряда снижаются. Как указано выше в пояснениях к блоку 3 методики, номинальное напряжение горения разряда следует принимать  $U_{d\_min} = 300$  В. Целесообразно сделать запас величиной около 20% по выходному напряжению источника питания тлеющего разряда. Запас используется для оптимизации технологического процесса, более эффективной тренировки поверхности полого катода на начальной стадии технологического процесса, повышения однородности распределения концентрации ионов в генерируемом ППО и по другим причинам.

Необходимо отметить, что оптимальное значения плотности ионного тока на поверхность обрабатываемого изделия, погруженного в пучково-плазменное образование с целью химико-термической обработки его поверхности, составляет в стационарном режиме горения разряда величину  $j_i \approx 5$  мА/см<sup>2</sup>, а в импульсном режиме амплитуда тока  $j_{im}$  должна составлять около 15 мА/см<sup>2</sup>. Соответственно, для определения требуемого значения выходного тока источника питания тлеющего разряда используются эти же значения плотности ионного тока в стационарном и импульсном режимах горения тлеющего разряда. Тогда в стационарном режиме горения разряда выходной ток, обеспечиваемый источником питания, должен быть равен:

$$I_d = I_c = I_a = j_i \cdot S_k. \quad (6)$$

В импульсном режиме горения разряда амплитуда тока тлеющего разряда:

$$I_{dm} = j_{im} \cdot S_k. \quad (7)$$

К другим ключевым параметрам источника питания тлеющего разряда относятся: максимальное значение выходной средней мощности, максимальное значение мощности в разрядном импульсе, частота следования импульсов в импульсно-периодическом режиме горения разряда, коэффициент заполнения разрядных импульсов.

Максимальное значение выходной средней мощности источника питания можно определить следующим образом:

$$P_{\text{вых\_ср}} = I_d \cdot 1,2 \cdot U_{d\_min}. \quad (8)$$

Максимальное значение мощности в разрядном импульсе

$$P_{\text{вых\_имп}} = I_{dm} \cdot 1,2 \cdot U_{d\_min}. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что при работе в импульсно-периодическом режиме горения разряда источник должен быть оснащен алгоритмом ограничения выходной средней мощности.

Инерционность процесса генерации плазмы делает целесообразным использование следующих диапазонов изменения параметров. Частота следования разрядных импульсов  $f = (0,1-2)$  кГц с дискретностью 100 Гц, коэффициент заполнения  $\gamma = (1-99)\%$  с дискретностью 1%.

8. Определение параметров источника электропитания источника(ов) электронов производится следующим образом. Ток инжектируемых электронов для обеспечения требуемого значения разрядного тока в ППО в стационарном режиме горения тлеющего разряда составляет:

$$I_{el\_1} = I_d / N. \quad (10)$$

В импульсном режиме горения разряда:

$$I_{el\_2} = I_{dm} / N. \quad (11)$$



Для  $eU_{dmin} = 300$  эВ,  $N = eU_{dmin} / W_i = 300 \text{ эВ} / 31,2 \text{ эВ} \approx 9,6$ .

Токи на анод в стационарном и импульсном режимах горения определяются, как

$$I_a = I_d + I_{el\_1}, \quad (12)$$

$$I_{am} = I_{dm} + I_{el\_2}. \quad (13)$$

Ток электронов во вспомогательном разряде источника электронов замыкается на анод, представляющий собой электрод, перекрытый мелкоструктурной сеткой с геометрической прозрачностью  $b$ , составляющей, как правило, 30–50%. Требуемое значение тока вспомогательного разряда оценивается в этом случае по величине  $I_{el\_2}$ :

$$I_{вспом} = I_{el\_2} / b. \quad (14)$$

Параметры источника питания отрицательного потенциала смещения определяются из следующих соображений. Выходное амплитудное значение тока источника электропитания в стационарном и импульсном режимах горения разряда:

$$I_b = j_i \cdot S_{изд}, \quad (15)$$

$$I_{bm} = j_{im} \cdot S_{изд}. \quad (16)$$

К другим ключевым параметрам источника питания отрицательного смещения подложки можно отнести: амплитуду выходного напряжения  $U_{bm}$ , максимальное значение выходной средней мощности, частоту следования импульсов в импульсно-периодическом режиме горения разряда, коэффициент заполнения разрядных импульсов. Диапазон изменения амплитуды выходного напряжения должен лежать в пределах 50–1000 В. Минимальное требуемое значение выходной средней мощности источника питания смещения можно определить следующим образом:

$$P_{вых\_cp\_b} = I_b \cdot U_{bm}. \quad (17)$$

Минимальное обеспечиваемое значение импульсной мощности в импульсно-периодическом режиме горения тлеющего разряда:

$$P_{вых\_имп\_b} = I_{bm} \cdot U_{bm}. \quad (18)$$

Процессы извлечения ионов из ППО на подложку малоинерционны. Это делает целесообразным использование следующих значений параметров. Частота следования разрядных импульсов  $f = 0, 50, 100$  кГц, коэффициент заполнения  $\gamma = (10–90)\%$  с дискретностью 1%.

9–10. В случае подключения обрабатываемых изделий к потенциалу полого катода расчет значений параметров источника электропитания тлеющего разряда в стационарном и импульсно-периодическом режимах горения соответственно производится следующим образом. Выходной ток, обеспечиваемый источником питания, должен быть равен:

$$I_d = I_c = I_a = j_i \cdot (S_{к+} \cdot S_{изд}). \quad (19)$$

В импульсном режиме горения разряда амплитуда тока тлеющего разряда:

$$I_{dm} = j_{im} \cdot (S_{к+} \cdot S_{изд}). \quad (20)$$

Величины  $P_{вых\_cp}$  и  $P_{вых\_имп}$  определяются из выражений (17) и (18). Частота следования разрядных импульсов должна составлять  $f = (0,1–2)$  кГц с дискретностью 100 Гц, коэффициент заполнения  $\gamma = (1–99)\%$  с дискретностью 1%.

11. Величины тока инжектируемых электронов в стационарном режиме горения разряда  $I_{el\_1}$ , в импульсно-периодическом режиме горения  $I_{el\_2}$ , и другие параметры источников электропитания источников электронов определяются из выражений (19–20).

На основе представленной выше обобщенной методики расчета геометрических параметров систем генерации пучково-плазменного образований и параметров систем электропитания в программе MathCad был разработан шаблон для реализации программного автоматизированного расчета указанных параметров для систем генерации ППО. С использованием шаблона проведены расчет и оптимизация систем генерации га-

зовых и газо-металлических ППО с полыми катодами объемом  $0,2 \text{ м}^3$  и протяженным полым катодом объемом  $\approx 0,3 \text{ м}^3$  с соотношением высоты к диаметру полого катода 2:1.

Созданная на основе расчетов система генерации ППО с полым катодом (установка генерации пучково-плазменных образований «ППУ-1») использовалась для разработки технологии нанесения твердых композиционных жаростойких покрытий на конструкционные и инструментальные материалы.

Комплексный анализ характеристик многослойного покрытия  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$  позволяет утверждать о большей эффективности новой схемы формирования покрытия в газо-металлическом пучково-плазменном образовании по сравнению с традиционной схемой генерации газо-металлической плазмы.

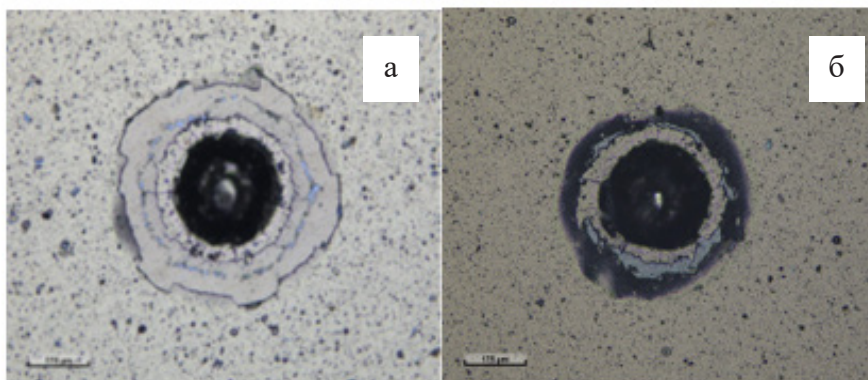
Сравнение результатов напыления покрытия  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$  в традиционной схеме вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления с дополнительным источником газовой плазмы [17–20] и в системе генерации газо-металлического ППО показало, что покрытие, синтезированное в системе генерации ППО, при прочих рав-

ных условиях эксперимента (температура подложки, величина напряжения смещения, токи дуговых испарителей) имеет большую, примерно на 15%, твердость и более высокую трещиностойкость (рис. 5).

Вероятнее всего, это является следствием равномерности и постоянства воздействия ионов реакционного газа на осаждаемые слои покрытия, а значит – повышения вероятности образования в нем необходимых функциональных соединений.

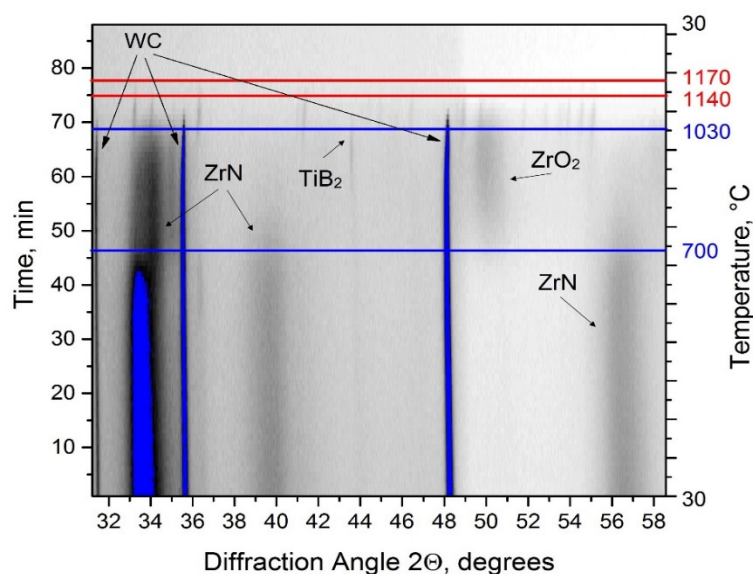
Выявленные данные по высокой (заметно превышающей 40 ГПа) твердости покрытия  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$ , полученного в новой разрядной схеме, а также хорошее сочетание высокой твердости с достаточной адгезией покрытия к подложке позволяют предположить перспективу его использования для упрочнения инструментов при резании труднообрабатываемых материалов, в частности закаленных сталей и сплавов.

С использованием синхротронного излучения проведено исследование жаростойкости синтезированного покрытия  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$ . В процессе нагрева образца покрытия  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$  на воздухе установлено (рис. 6), что структура покрытия стабильна до температур  $\sim 700^\circ\text{C}$ .



**Рис. 5.** Характерный вид отпечатков Роквелла покрытий системы  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$  на подложках из твердого сплава ВК8, осажденных в традиционной разрядной схеме (а) (твердость  $\text{HV} = 40,9 \text{ ГПа}$ ) и в разрядной схеме для генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом (б) (твердость  $\text{HV} = 47,8 \text{ ГПа}$ )

**Fig. 5.** A characteristic view of Rockwell imprints of coatings of the  $(\text{Zr-Ti-B-Si-Ni})\text{N}$  system on WC+8% Co hard alloy substrates deposited in the traditional discharge scheme (a) (hardness  $\text{HV} = 40.9 \text{ GPa}$ ) and in the discharge scheme for generating beam-plasma formation in a non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode (b) (hardness  $\text{HV} = 47.8 \text{ GPa}$ )



**Рис. 6.** Серия рентгенограмм покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N на подложке из сплава BK8 (WC+8% Co), полученных в процессе нагрева на воздухе до температуры 1170 °С и последующего охлаждения до 30 °С

**Fig. 6.** A series of X-ray diffraction patterns of the (Zr+Ti-B-Si-Ni)N coating on a WC8 (WC+8% Co) alloy substrate obtained during heating in air to a temperature of 1170 °C and subsequent cooling to 30 °C

Выше указанной температуры происходит реорганизация структурно-фазового состояния покрытия, проявляющаяся в исчезновении рефлексов нитрида циркония (ZrN) в области углов  $\sim 40^\circ$  и  $57^\circ$  и появлении широкого рефлекса в области  $50^\circ$ , относящегося к оксиду циркония ( $ZrO_2$ ). Наблюдаемое структурно-фазовое преобразование согласуется с результатами РФА для покрытия (Zr+Ti-B-Si-Ni)N после отжига при  $T = 700^\circ\text{C}$ . Далее при температуре  $\sim 1030^\circ\text{C}$  начинается интенсивное окисление материала покрытия, широкие рефлексы, которые соответствуют нитриду циркония ( $\sim 34^\circ$ ) и оксиду циркония ( $\sim 50^\circ$ ), исчезают и появляется группа слабых узких рефлексов. При температуре  $\sim 1140^\circ\text{C}$  происходит разрушение образца и выход дифрагирующей поверхности из оптической геометрии дифрактометра, все рефлексы от покрытия исчезают.

### Заключение

В результате цикла исследований разработана универсальная методика оценки и

расчета параметров систем генерации технологических пучково-плазменных образований для ионно-плазменной обработки поверхности. Методика включает последовательность операций и позволяет на основе данных по требуемой средней плотности ионного тока  $j_{i\_cp}$ , извлекаемого из плазменного образования для обработки деталей, и требований к зоне для размещения изделий (диаметр  $D$  (м) и высота рабочей зоны  $h$  (м)), рассчитать набор геометрических параметров электро-разрядной системы, параметры источников электронов, параметры систем электропитания. На основе представленной выше обобщенной методики расчета геометрических параметров систем генерации пучково-плазменного образований и параметров систем электропитания в программе MathCad разработан шаблон для реализации программного автоматизированного расчета указанных параметров для систем генерации пучково-плазменных образований.

Созданная на основе расчетов система генерации ППО с полым катодом использовалась для разработки технологии нанесения

твердых композиционных жаростойких покрытий на конструкционные и инструментальные материалы. Сравнение результатов напыления покрытия (Zr-Ti-B-Si-Ni)N в традиционной схеме вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления с дополнительным источником газовой плазмы и в системе генерации газо-металлического ППО показало, что покрытие, синтезированное в системе генерации ППО, при прочих равных условиях эксперимента (температура подложки, величина напряжения смещения, токи дуговых испарителей) имеет большую, примерно на 15%, твердость и более высокую трещиностойкость.

Исследования жаростойкости системы (Zr+Ti-B-Si-Ni)N с использованием синхротронного излучения показали его стойкость к окислению до температуры  $\approx 1030$  °С.

#### Благодарности / Acknowledgments

*Работы по разработке методики расчета и оценки параметров систем генерации ППО выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001. Исследования покрытий системы Zr+Ti-B-Si-Ni)N с использованием синхротронного излучения производились при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.1.12.*

*The work on the development of a methodology for calculating and estimating the parameters of BPF generation systems was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No. FWRM-2022-0001. Studies of coatings of the (Zr+Ti-B-Si-Ni)N system using synchrotron radiation 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) within the framework of activity No. 3.1.12.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метель А. С. Расширение рабочего диапазона давлений тлеющего разряда с полым катодом // ЖТФ. 1984. Т. 54, № 2. С. 241–247.
2. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. New York: John Wiley and Sons Inc., 1994. P. 572.
3. Metel A. S., Grigoriev S. N., Melnik Yu. A., Panin V. V. Filling the vacuum chamber of a technological system with homogeneous plasma using a stationary glow discharge // Plasma physics reports. 2009. V. 35, Iss. 12. P. 1058–1067. DOI: 10.1134/S1063780X09120095.
4. Korolev Yu. D., Koval N. N. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. Article number 323001. DOI: 10.1088/1361-6463/aacf10.
5. Vizir A. V., Yushkov G. Yu., Oks E. M. Further Development of a Gaseous Ion Source Based on Low-pressure Hollow Cathode Glow // Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71, Iss. 2. P. 728–730. DOI: 10.1063/1.1150275.
6. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Koval N. N., Kovalsky S. S., Lopatin I. V., Ostroverkhov E. V., Pedin N. N., Yakovlev V. V., Schanin P. M. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas. 2019. V. 26, Iss. 12. Article number 123510. DOI: 10.1063/1.5126485.
7. Ignatov D. Y., Lopatin I. V., Denisov V. V., Koval N. N., Akhmadeev 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.
8. Ignatov D. Y., 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.
9. 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.
10. Ivanov Yu. F., Laskovnev A. P., Denisov V. V., Uglov V. V., Petrikova E. A., Krysinina O. V., Shymanski V. I., Cherenda N. N., Koval N. N. Nitriding of commercial pure titanium in the plasma of frequency-pulsed non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode // High



Temperature Materials Processes. 2017. V. 21, Iss. 1. P. 13–23. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2017020052.

11. Denisov V. V., Denisova Yu. A., Vardanyan E. L., Ostroverkhov E. V., Leonov A. A., Savchuk M. V. Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure // Russian Physics Journal. 2021. V. 64, Iss. 1. P. 145–150. DOI: 10.1007/s11182-021-02310-9.

12. Gavrilov N. V., Bureyev O. A., Emlin D. R., Kamenetskikh A. S. Effect of Anode Dimensions on Characteristics of Nonself-Sustained Hollow Cathode Discharge // Proc. of 15th International Symposium on High Current Electronics, 2008. P. 175–178.

13. Ульянов К. Н. Сверхплотный тлеющий разряд // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, № 3. С. 363–373.

14. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Koval N. N., Ostroverchov E. V. Low-temperature plasma source based on a cold hollow-cathode arc with increased service life // HTMP. 2016. V. 20, Iss. 4. P. 309–316. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2016019390.

15. Ostroverkhov E. V., Denisov V. V., Lopatin I. V., Koval N. N. Effect of the mesh emission electrode shape on the distribution of the plasma density generated in the working chamber // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1115, Iss. 3. Article number 032012. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032012.

16. Yakovlev V. V., Denisov V. V., Koval N. N., Kovalsky S. S., Ostroverkhov E. V., Egorov A. O.,

Savchuk M. V. Generation of plasma with increased ionization degree in a pulsed high-current low-pressure hollow cathode discharge // Russian Physics Journal. 2021. V. 63, Iss. 2. P. 1757–1765. DOI: 10.1007/s11182-021-02229-1.

17. Kolubaev A. V., Sizova O. V., Denisova Yu. A., Leonov A. A., Teryukalova N. V., Novitskaya O. S., Byeli A. V. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy // Physical Mesomechanics. 2022. V. 25, Iss. 4. P. 306–317. DOI: 10.1134/S102995992204004X.

18. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // Surface and Coating Technology. 2002. V. 149, Iss. 2–3. P. 95–113. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01441-4.

19. Sobol O. V., Postelnyk A. A., Meylekhov A. A., Andreev A. A., Stolbovoy V. A., Gorban' V. F. Structural Engineering of the Multilayer Vacuum Arc Nitride Coatings Based on Ti, Cr, Mo and Zr // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2017. V. 9, Iss. 3. P. 03003-1–03003-6. DOI: 10.21272/jnep.9(3).03003.

20. Zhao S. S., Zhao Y. H., Cheng L. S., Denisov V. V., Koval N. N., Yu B.-H., Mei H.-J. Effects of Substrate Pulse Bias Duty Cycle on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Cu-N Films Deposited by Magnetic Field-Enhanced Arc Ion Plating // Acta Metallurgica Sinica-English Letters. 2017. V. 30, Iss. 2. P. 176–184. DOI: 10.1007/s40195-017-0536-0.