



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

## Моделирование теплового и структурного состояния полого катода вакуумного плазмотрона

Ольга Дутова<sup>1, а, \*</sup>, Андрей Шишкин<sup>1, б</sup>, Владимир Чередниченко<sup>2, с</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>а</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-5366-8010>,  [odutova@ngs.ru](mailto:odutova@ngs.ru), <sup>б</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5431-0077>,  [andrshi@itp.nsc.ru](mailto:andrshi@itp.nsc.ru),

<sup>с</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-4844-5928>,  [bm@skbterm.ru](mailto:bm@skbterm.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.387.143 + 536.2 + 548.53

#### История статьи:

Поступила: 14 ноября 2017

Рецензирование: 12 января 2018

Принята к печати: 08 февраля 2018

Доступно онлайн: 15 марта 2018

#### Ключевые слова:

Плазмотрон

Катод

Температурное поле

Рекристаллизация

Размер зерна

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Дуговые плазмтроны широко используются в различных областях науки и техники. Ресурс непрерывной работы электродов определяет эффективность плазмтрона и является одной из его важнейших технологических характеристик. Теоретическое и экспериментальное исследование физико-механических процессов в материале катода направлено на повышение длительности его работы и является актуальной задачей. **Цель работы:** создание физико-математических моделей и численное исследование тепловых и рекристаллизационных процессов, происходящих в полом катоде вакуумного плазмтрона под воздействием электрической дуги. **Методы исследования.** Для исследования температурного поля катода при воздействии электрической дуги проводится совместное численное решение дифференциального уравнения Фурье с внутренним источником тепла, уравнения Лапласа для электрического потенциала и уравнения закона Ома. При работе плазмтрона в катоде формируются и растут зародыши новых зёрен. Наиболее существенными для рекристаллизационных процессов являются три взаимосвязанных между собой явления – это нагрев материала, зарождение и рост новых зёрен. На основе данных о температурном поле и параметрах активационных моделей процессов зарождения и роста зёрен в вольфраме получено распределение размера кристаллического зерна по объёму катода. Предложенные математические модели позволяют проводить численное моделирование различных режимов работы полого катода, оценивать изменение структуры материала в процессе его нагрева и могут быть использованы для исследования и повышения эксплуатационных характеристик полых катодов вакуумных плазмтронов. **Результаты и обсуждение.** Полученные решения показали, что нагрев катода характеризуется большими скоростями и быстрым выходом на стационарный режим. Нужно отметить резкое изменение температуры по длине катода в окрестности активной зоны (поверхности нагрева). Характерным признаком распределения температуры являются значительные осевые и радиальные градиенты температуры, которые могут приводить к большим термическим напряжениям в катоде. Результаты расчёта показали, что размер зерна увеличивается с уменьшением перегрева над температурой начала рекристаллизации. Это связано с тем, что с ростом перегрева скорость образования новых зёрен опережает скорость их роста, и зерно начинает уменьшаться в размере. Для исследованных значений плотности потока среднее по длине катода значение размера первично рекристаллизованного зерна находится в интервале 3,7...14 мкм. Время, необходимое для получения монокристаллической стенки полого катода в результате собирательной и/или вторичной рекристаллизации, составляет 1...32 ч. В результате полная рекристаллизация зерна в поперечном сечении вольфрамового катода может происходить за один цикл работы плазмтрона. Это означает, что электрофизические и тепловые характеристики катода существенно меняются в ходе его работы. Размер зерна также оказывает существенное влияние на сопротивление разрушающему воздействию термических напряжений.

**Для цитирования:** Дутова О.С., Шишкин А.В., Чередниченко В.С. Моделирование теплового и структурного состояния полого катода вакуумного плазмтрона // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 55–68. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-55-68.

## Введение

В настоящее время дуговые плазмтроны широко используются в различных областях науки и техники, а также для решения новых электротехнологических задач [1]. Круг плазменно-термических процессов, включающих

#### \*Адрес для переписки

Дутова Ольга Степановна, к.ф.-м. н., н.с.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Академика Лаврентьева, 1,

630090, г. Новосибирск, Россия

Тел.: 8 (383) 333-10-96, e-mail: [odutova@ngs.ru](mailto:odutova@ngs.ru)

их применение, все время увеличивается. Так, большой экономический эффект дает использование плазмотронов на теплоэлектростанциях для розжига пылеугольных котлов [2–5]. Активно ведутся исследования по использованию плазмотронов в технологиях по переработке техногенных отходов [6–9]. В силу этого типы используемых установок (аппаратов), их мощности, а также режимы эксплуатации отличаются большим многообразием [1, 10]. Все это делает актуальным совершенствование существующих и разработку новых конструкций плазмотронов.

Важнейшим элементом вакуумного плазмотрона является полый катод, определяющий все электрические, энергетические и эксплуатационные характеристики вакуумной плазменной установки [11–14]. Использование вакуумных плазмотронов с катодами в виде полужамкнутой полости позволило получить значительные плотности тепловых потоков на поверхности нагрева при низких рабочих напряжениях (30...100 В), а также возможность получения высокого КПД (до 80...90 %) в диапазоне давлений от 1 до  $10^3$  Па [12, 14]. Полый катод представляет собой цилиндрическую трубку, через которую подается газ в камеру низкого давления. Открытый конец трубки направлен в сторону анода. Длина катодной трубки должна составлять несколько ее внутренних диаметров.

Процессы теплообмена в катодном узле достаточно сложны. Экспериментальное изучение процессов в полном катоде трудоемко, и возможно только косвенное измерение физических величин, определяющих протекание процессов внутри полости. Тепловое состояние катода формируется под воздействием плазмы на его внутреннюю поверхность, является следствием процессов, происходящих в ней, и, следовательно, сильно зависит от ее физических параметров.

Ресурс работы электродуговых нагревателей газов определяется скоростью разрушения электродов [12–14]. Механизм эрозии материала электродов зависит от многих факторов – используемого материала, условий охлаждения, давления в разрядной камере и в немалой степени от параметров дугового разряда. Поэтому теоретическое и экспериментальное исследование физико-механических процессов в материале электрода плазмотрона, направленное на повы-

шение длительности их работы, является актуальной задачей.

Цель настоящей работы: создание физико-математических моделей и численное исследование тепловых и рекристаллизационных процессов, происходящих в полном катоде вакуумного плазмотрона под воздействием электрической дуги.

## Методика исследований

### *Физико-математическое моделирование процессов нагрева полых катодов*

Взаимодействие плазмы с твердым телом определяется не только процессами, происходящими на его поверхности, но и изменениями физических характеристик в объеме материала. Для катодов дугового разряда поле температур в объеме материала и на его поверхности является одной из основных величин, характеризующих их работоспособность. С одной стороны, плотность эмиссионного тока и эрозия зависят от поверхностного распределения температуры, а с другой – возникающие из-за неравномерности нагрева катода температурные напряжения могут привести к его разрушению еще до оплавления поверхности контакта с дугой. Кроме того, механическому разрушению катода в ходе эксплуатации может способствовать ухудшение его электрофизических и механических характеристик, связанное с изменением структуры металла под воздействием высоких температур, термоциклирования и рекристаллизации.

В работах [15–18] показано, что положение зоны привязки тока к катоду (активной зоны) определяется сложной взаимосвязью электродинамических и газодинамических процессов, протекающих в катоде. Активная зона локализована в узком кольце, ширина ( $z_1, z_2$ ) которого вдоль оси катода  $z$  увеличивается с ростом тока. Из экспериментов известно [12, 16], что увеличение тока разряда приводит к росту максимума температуры катода и перемещению его по оси  $z$  с незначительными изменениями ширины активной зоны.

Рассмотрим теплообмен в полном катоде, который представляет собой цилиндрическую трубку с внутренним и внешним радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно. Длина  $L$  катодной трубки

должна составлять несколько ее внутренних диаметров. Материал электрода – вольфрам. За счет взаимодействия плазмы с внутренней поверхностью формируется кондуктивный тепловой поток, определяющий в целом температурное поле катода. Систематическая обработка большого числа экспериментов [1–4, 12, 15–16, 19–20] показала, что зависимость суммарного теплового потока  $q_{\Sigma} = q_i + q_{re} - q_{em}$  от координаты  $z$  можно задать в виде функции распределения Гаусса  $q_{\Sigma}(z) = q_{\max} \exp[-(z - z_{\max})^2/\sigma_1]$ . Здесь  $q_i$ ,  $q_{re}$ ,  $q_{em}$  – плотности потоков, переносимые ионами, обратными электронами и электронами эмиссии;  $z_{\max}$  – координата максимума теплового потока  $q_{\max}$ , через которую проходит ось симметрии;  $\sigma_1$  – расстояние от оси симметрии до точки перегиба.

Вследствие независимости параметров тепловых потоков, формы и материала катода от угловой координаты уравнение теплопроводности можно представить в цилиндрических координатах в двумерном приближении [12, 21]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + j_0^2(r, z) \rho(T) = c(T) d(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $c$ ,  $d$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  – удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности, удельное сопротивление материала;  $j_0(r, z)$  – распределение плотности тока в катоде, которая определяется из решения уравнения Лапласа, характеризующего распределение электрического потенциала  $\varphi$  в стенке катода:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = 0. \quad (2)$$

По найденному распределению  $\varphi(r, z)$  плотность тока  $j_0$  определяется по формуле

$$j_0 = \frac{1}{\rho(T)} \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Граничные условия к уравнению (1) следующие:

на внутренней поверхности:

$$-\lambda \frac{\partial T(R_1, z)}{\partial r} = q_{\Sigma}(z), \quad 0 \leq z \leq L;$$

на внешней поверхности – излучение по закону Стефана–Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial T(R_2, z)}{\partial r} = -\varepsilon(T) \sigma T^4(R_2, z), \quad 0 \leq z \leq L,$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты материала;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;

на торцевой поверхности катода учитываются потери излучением:

$$-\lambda \frac{\partial T(r, 0)}{\partial z} = -\varepsilon(T) \sigma T^4(r, 0), \quad R_1 \leq r \leq R_2;$$

на границе с катододержателем предполагается идеальный тепловой контакт:

$$T(r, L) = T_{ch}, \quad R_1 \leq r \leq R_2,$$

где  $T_{ch}$  – температура катододержателя.

Начальное условие:

$$T(r, z, t) = T_0.$$

Граничные условия к уравнению (2) следующие:

на внутренней поверхности в зоне привязки тока к катоду:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi(R_1, z)}{\partial r} = j_{\Sigma}(z), \quad 0 \leq z \leq L;$$

на внешней поверхности:

$$\frac{\partial \varphi(R_2, z)}{\partial r} = 0, \quad 0 \leq z \leq L;$$

на торце и на границе с катододержателем:

$$\frac{\partial \varphi(r, 0)}{\partial z} = 0, \quad \varphi(r, L) = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2.$$

Для решения задачи методом конечных разностей применялась схема второго порядка аппроксимации по пространственным координатам и первого – по времени [22]. Полученные разностные уравнения решались методом прогонки.

Расчеты проводили для тепловых потоков с параметрами:

а)  $q_{\max} = 2,5$  МВт/м<sup>2</sup>,  $z_{\max} = 0,02027$  м,  $\sigma_1 = 0,0004$ ;

б)  $q_{\max} = 3,5$  МВт/м<sup>2</sup>,  $z_{\max} = 0,02027$  м,  $\sigma_1 = 0,00022$ . При расчетах принимали, что теплофизические свойства материала катода (вольфрам) зависят от температуры.

Размеры катода:  $R_1 = 22,5$  мм,  $R_2 = 27,5$  мм,  $L = 70$  мм.

### Зависимость роста зерна от температуры в материале полого катода

Поликристалл состоит из большого числа зерен с различно ориентированными кристаллическими решетками. В межзеренных границах (МЗГ) нарушена правильность расположения атомов, повышена концентрация примесей. В соответствии с длиной волны электрона в металле рассеяние электронов в том числе происходит на точечных дефектах, которых особенно много в МЗГ. Поэтому площадь МЗГ, а следовательно, и размер зерна представляют для нас наибольший интерес, так как оказывают существенное влияние на электросопротивление и теплопроводность материала катода.

Повышение температуры стимулирует начало процесса рекристаллизации. Рекристаллизация зависит от чистоты металла, содержания легирующих элементов, способа, скорости и температурного интервала деформации, так как все эти факторы определяют характер структуры, сформировавшейся при деформации, и скорости протекающих при рекристаллизации процессов. Обзор механизмов образования зародышей рекристаллизации приведен в работе [23]. Из экспериментальных данных однозначно следует, что зарождение центров рекристаллизации происходит на границах зерен или блоков. На границе, где происходит зарождение нового зерна, требуется высокая степень деформации  $\epsilon_d \geq 0,43$ . Скорость роста первых центров рекристаллизованных зерен увеличивается с  $10^{-15}$  до  $10^{-10}$  см/с, а энергия активации  $\Delta H_G$  – с 360 до 753 кДж/моль при переходе от монокристаллического вольфрама к вольфраму дугового вакуумного переплава (ДВП). Температура начала рекристаллизации для нелегированного вольфрама  $T_R = 1373...1573$  К. Вторичная рекристаллизация начинается при 2273...2373 К [24, 25]. Для легированного вольфрама эти числа на 300...600 К выше. В работе [26] приводятся значения для  $\Delta H_G = 473,5$  кДж/моль и энергии активации самодиффузии  $E_D = 640,6$  кДж/моль для ДВП-вольфрама. Также отмечается, что скорость миграции межзеренных границ в чистом вольфраме в  $\approx 10$  раз выше, чем в легированном.

При работе катода плазмотрона происходит процесс формирования и роста зародышей новых зерен. Температурная зависимость параме-

тров  $N$  – скорости образования зародышей недеформированного зерна и  $G$  – скорости их роста может быть выражена с помощью уравнений [27]

$$G = K_G \exp(-\Delta H_G / RT); \quad (4)$$

$$N = K_N \exp(-\Delta H_N / RT), \quad (5)$$

где  $K_G, K_N$  – предэкспоненциальные множители, соответствующие гипотетическим скоростям роста зерен и зародышеобразования при  $T \rightarrow \infty$  соответственно;  $\Delta H_G$  – энергия активации в процессах роста зерен;  $\Delta H_N$  – энергия активации в процессах зарождения зёрен;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Рост зёрен высокой степени чистоты в изотермических условиях обычно описывается параболическим законом [27]:

$$D^2 - D_0^2 = K_0 \exp(-\Delta H / RT) \tau, \quad (6)$$

где  $D_0$  и  $D$  – средние значения начального и текущего диаметров зерен;  $K_0$  – постоянный коэффициент;  $\Delta H$  – энергия активации;  $\tau$  – время. Так как средняя линейная скорость перемещения границ зерен  $G$  как в изотермических, так и в неизотермических условиях равна  $0,5(dD/dT)$ , то в случае нагрева с постоянной скоростью  $b$  скорость роста зерен выражается формулой

$$G = 0,5b(dD / d\tau), \quad (7)$$

и может определяться непосредственным дифференцированием зависимости  $D = f(\tau)$ , где  $\tau$  – время изотермической выдержки.

В соответствии с уравнением (6) линейная скорость роста зерен может быть выражена формулой

$$\begin{aligned} G &= 0,5(dD / d\tau) = \\ &= 0,25(K_0/D) \exp(-\Delta H / RT). \end{aligned} \quad (8)$$

По данным [26], в уравнении (4)  $K_G = 3 \cdot 10^6$  м/с для чистого и  $2,3 \cdot 10^5$  м/с – для легированного W. Скорость образования зародыша при рекристаллизации  $[m^{-2} \cdot c^{-1}]$  в соответствии с уравнением (5) имеет активационный механизм, поэтому для расчета по аналогии можно воспользоваться формулой для скорости гетерогенного зародышеобразования [28], предполагая, что скрытая теплота образования экви-



валентна в данном случае энергии активации первичной рекристаллизации:

$$N = \frac{16\pi n'}{a^4} \left( \frac{\gamma T_R \mu}{\rho \Delta H_G \Delta T} \right)^2 D_w \exp \times \\ \times \left[ -16\pi \gamma^3 \frac{(T_R \mu / \rho \Delta H_G \Delta T)^2}{k_B (T_R + \Delta T)} \right], \quad (9)$$

где  $n' = 10^{16} \epsilon_d = 0,43 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$  – поверхностная плотность дислокаций в дорекристаллизационном (деформированном) зерне, поскольку максимальная плотность дислокаций в сильно деформированном зерне составляет  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$  [24];  $a = 0,31649 \text{ нм}$  – постоянная решетки вольфрама;  $\gamma = 2,9 \text{ Дж/м}^2$  – энергия поверхности [29];  $\mu = 0,183 \text{ кг/моль}$  – молярная масса W;  $\rho = 19,263 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность вольфрама;  $\Delta T$  – температура перегрева над  $T_R$ ;  $D_w = 0,04 \exp \times (-5,4 \text{ эВ} / k_B T) + 46 \exp(-6,9 \text{ эВ} / k_B T)$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$  – коэффициент самодиффузии W [30];  $k_B$  – постоянная Больцмана.

Средний радиус зерна в направлении рекристаллизации в соответствии с (8):

$$r(\Delta T(\tau)) = \int_0^{\tau_R} G(\Delta T(\tau)) d\tau. \quad (10)$$

Число зёрен на поверхности  $S$  за время полной первичной рекристаллизации  $\tau_R$ :

$$Z(\Delta T(\tau_R)) = S \int_0^{\tau_R} N(\Delta T(\tau)) d\tau. \quad (11)$$

В то же время число зерен на поверхности после рекристаллизации:

$$Z(\Delta T(\tau_R)) \approx \frac{S}{\pi r^2}. \quad (12)$$

Подставляя уравнение (10) в (12) и приравнявая к (11), получаем интегральное уравнение для нахождения  $\tau_R$ :

$$\frac{1}{\pi \left( \int_0^{\tau_R} G(\Delta T(\tau)) d\tau \right)^2} = \int_0^{\tau_R} N(\Delta T(\tau)) d\tau, \quad (13)$$

которое в приближении слабой зависимости  $\Delta T$  от  $\tau$  в результате быстрого установления стационарного распределения температуры можно записать так:

$$\frac{1}{\pi (G(\Delta T) \tau_R)^2} = N(\Delta T) \tau_R, \quad (14)$$

откуда

$$\tau_R = (p G^2 N)^{-1/3}, \quad (15)$$

$$D(\Delta T) = 2G(\Delta T) \tau_R = 2 \left( \frac{G}{\pi N} \right)^{1/3}. \quad (16)$$

Время рекристаллизации, вычисляемое по формуле (14), должно быть ограничено сверху ресурсом работы плазмотрона (500 ч) и снизу минимальным временем диффузии  $\tau_D$  в сфере с радиусом, равным  $a$ :  $\tau_D(T) = (2a)^2/D(T)$ .

## Результаты и их обсуждение

### Распределение температур по объему катода

Нагрев катода характеризуется большими скоростями и достаточно быстрым выходом на стационарный режим. Уже с момента времени  $t \sim 50 \dots 55 \text{ с}$  температура всех точек изменяется незначительно (рис. 1). Рис. 2 дает представление о стационарном тепловом состоянии катода. Можно отметить резкое изменение температуры по длине катода в окрестности активной зоны (нагреваемой поверхности) и плавное изменение в остальных частях конструкции. Перепад температуры по толщине катода  $\delta = R_2 - R_1$  не превышает  $\sim 100 \dots 200 \text{ К}$ . Как показано на рис. 1 и 2, в материале катода возникают большие осевой и радиальный градиенты температуры.

Отсюда следует, что, катод находится не только под действием больших тепловых нагрузок, но и значительных термомеханических напряжений. При воздействии дуги на поверхность катода уже в начале процесса нагрева происходит интенсивное объемное расширение металла в зоне дугового воздействия, причем интенсивность и величина расширения определяются скоростью и температурой нагрева. Увеличению объема препятствуют холодные слои, окружающие область нагрева, в результате чего в зоне температурного влияния развиваются сжимающие напряжения, величина которых тем больше, чем выше температура нагрева металла. Растягивающие напряжения могут превышать предел прочности и способствовать формирова-

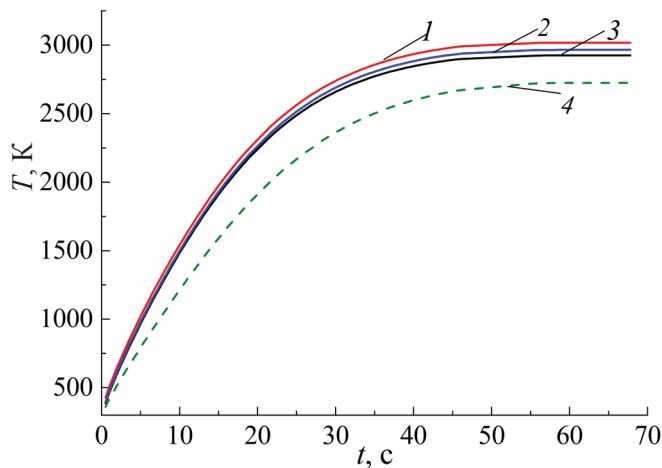


Рис. 1. Изменение температуры от времени в сечениях катода  $z = z_{\max}$  (1–3) и  $z = L/2$  (4) при  $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$ :  
1 –  $r = R_1$ ; 2 –  $r = R_1 + \delta/2$ ; 3 –  $r = R_2$ ; 4 –  $r = R_1$

Fig. 1. Temperature history for cathode cross-sections  $z = z_{\max}$  (1–3) and  $z = L/2$  (4) at  $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$ :  
1 – is  $r = R_1$ ; 2 – is  $r = R_1 + \delta/2$ ; 3 – is  $r = R_2$ ; 4 – is  $r = R_1$

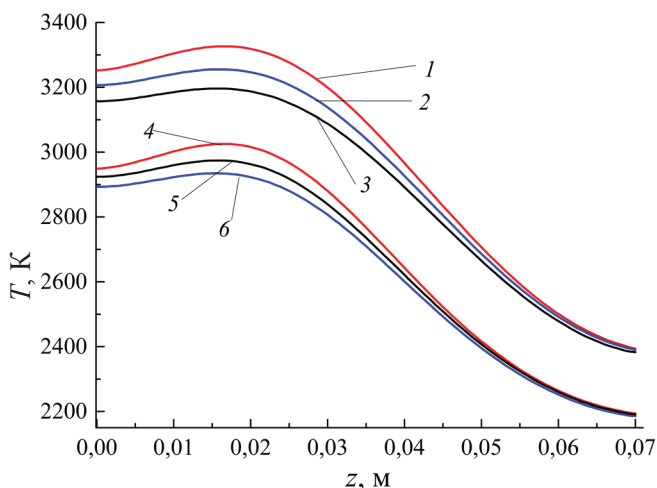


Рис. 2. Распределение температуры по длине катода на момент времени  $t = 55 \text{ с}$  при  $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$  (1–3) и  $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$  (4–6):  
1, 4 –  $r = R_1$ ; 2, 5 –  $r = R_1 + \delta/2$ ; 3, 6 –  $r = R_2$

Fig. 2. Temperature distribution along the length of the cathode at time  $t = 55 \text{ s}$  at  $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$  (1–3) and  $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$  (4–6):  
1, 4 – are  $r = R_1$ ; 2, 5 – are  $r = R_1 + \delta/2$ ; 3, 6 – are  $r = R_2$

нию микротрещин. В дальнейшем все это может вызвать изменения в распределении температуры (повышение температуры поверхности, ее испарение, увеличение эрозии).

Сопоставление положения зоны привязки тока с распределением температуры по поверх-

ности показывает, что максимум температуры стенки катода находится в зоне привязки тока, а длина высокотемпературной зоны значительно превосходит ее длину.

### Результаты расчета первичной и вторичной рекристаллизации

Наиболее существенными для определения первичной рекристаллизации являются три взаимосвязанных между собой процесса: процесс нагрева материала катода, процесс зарождения и процесс роста недеформированного зерна. Результаты расчёта представлены на рис. 3 и 4. При малых перегревах до  $\Delta T = 500 \text{ К}$  над  $T_R = 1423 \text{ К}$  размер зерна увеличивается (рис. 3) из-за низких значений  $N$  (рис. 4) и ограничения времени первичной рекристаллизации сверху (рис. 5). Число зародышей рекристаллизации очень мало и времени хватает для собирательной и/или вторичной рекристаллизации и получения монокристаллической по толщине стенки вольфрамового катода. Дальнейший перегрев вызывает увеличение  $N$ , превышение скорости ее изменения над скоростью изменения  $G$  и соответствующее уменьшение среднего размера зерна  $D$ .

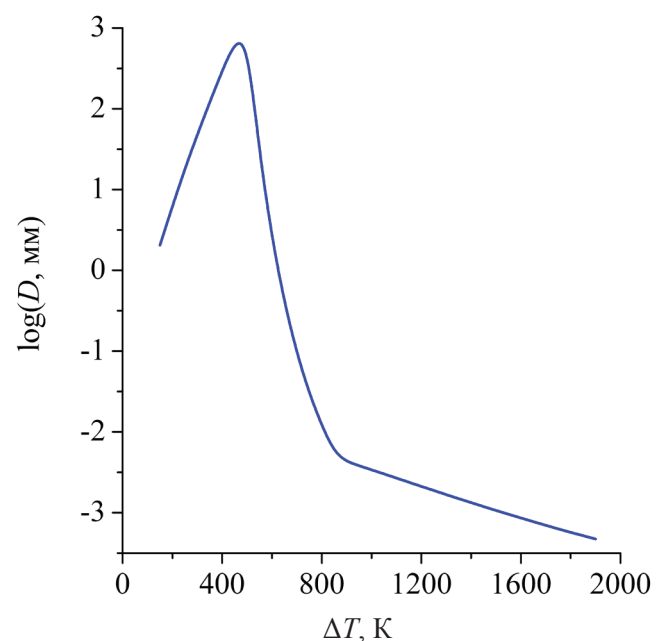


Рис. 3. Зависимость размера рекристаллизованного зерна от перегрева

Fig. 3. Dependence of the size of recrystallized grain on superheating

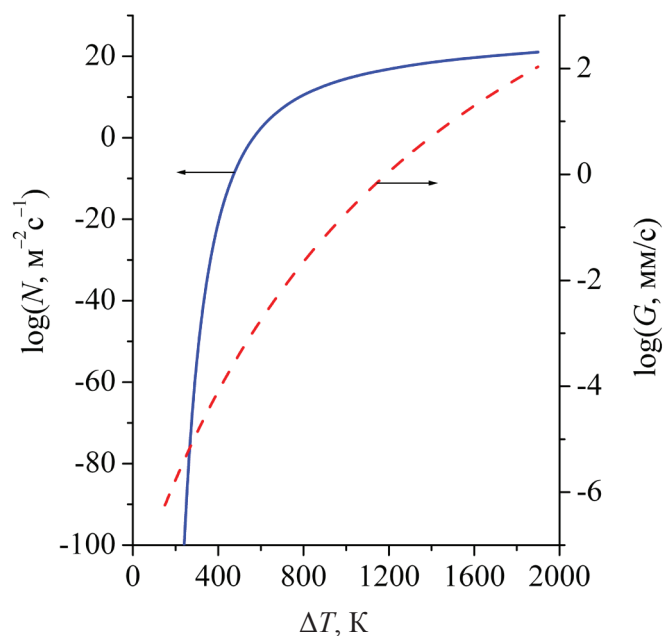


Рис. 4. Зависимость скоростей образования и роста зерна от перегрева

Fig. 4. Dependence of grain formation and grain growth rates on superheating

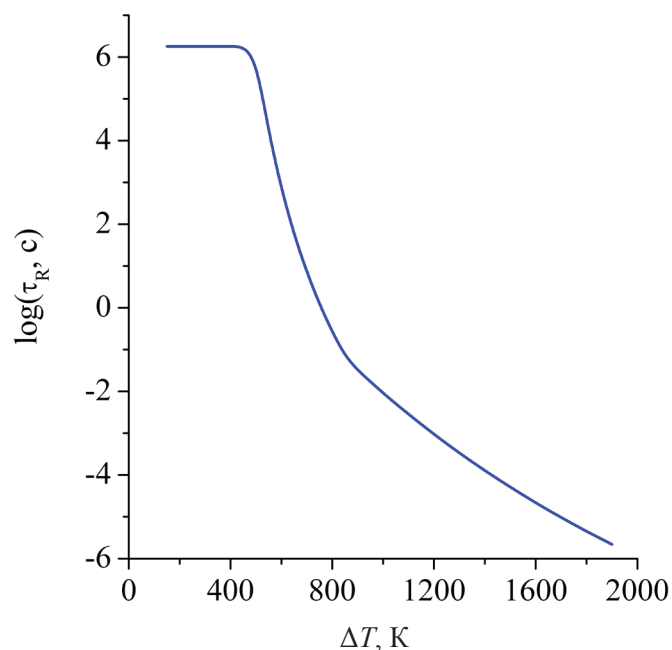


Рис. 5. Зависимость времени окончания первичной рекристаллизации от перегрева

Fig. 5. Dependence of the end of primary recrystallization on superheating

На рис. 6 показано распределение среднего размера рекристаллизованного зерна  $D$  по радиусу полого катода для различных значений  $z$ , рассчитанное для  $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$  и  $t = 54 \text{ с}$  (см.

рис. 1 и 2). Видно, что изменение  $D$  по радиусу незначительно по сравнению с его изменением по длине катода. Поэтому на рис. 7 показано распределения роста зерна по длине активной зоны катода для радиуса, отвечающего середине стенки катода.

Из-за высоких скоростей образования зародышей рекристаллизации  $N$  зерно уменьшается на более горячих участках катода и увеличивается на более холодных (см. рис. 2 и 3), где скорость роста рекристаллизованного зерна  $G > N$  (см. рис. 4). Следует отметить, что средний размер зерна после первичной рекристаллизации, получаемый в рамках уравнений (4), (9), (16), очень чувствителен к параметрам модели. В качестве значений параметров для расчета (представлены выше) мы взяли значения, полученные в исследованиях разных авторов [24, 29, 30]. Такой набор параметров мог оказаться неоптимальным для материала конкретного катода. Для сравнения на рис. 8 представлен пример фотографии излома катода плазмотрона на длине 50 мм.

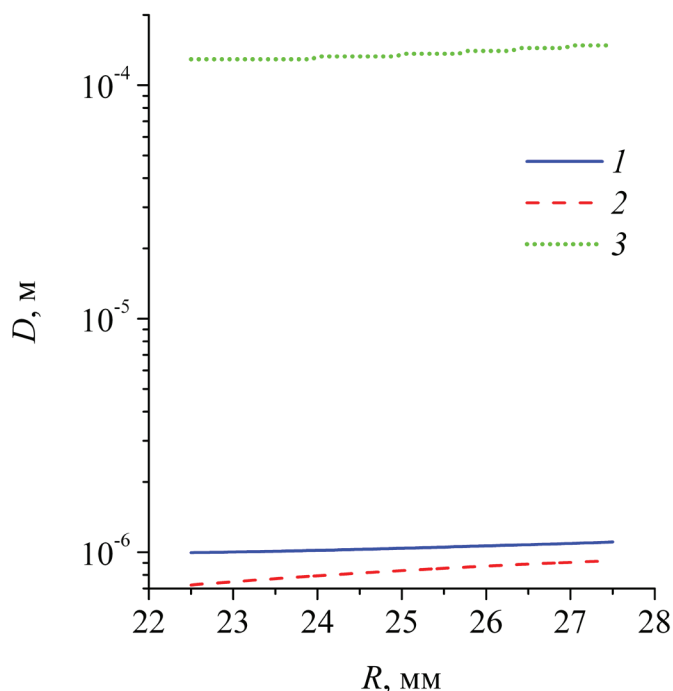


Рис. 6. Распределение размера рекристаллизованного зерна по радиусу катода при  $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$ :

1 – при  $z = 0 \text{ мм}$ ; 2 – при  $z = 20 \text{ мм}$ ; 3 – при  $z = 70 \text{ мм}$

Fig. 6. Distribution of the size of the recrystallized grain along the radius of the active zone of the cathode at  $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$ :

1 – is for  $z = 0 \text{ mm}$ ; 2 – is for  $z = 20 \text{ mm}$ ; 3 – is for  $z = 70 \text{ mm}$

Фотографии сделаны с использованием оптического микроскопа «ЛОМО». Средний размер зерна на длине 50 мм составил 10 мкм. Отклонение расчета от эксперимента (см. рис. 7) составляет 2,5...3 раза. В реальных условиях работы плазмотрона электрод может многократно нагре-

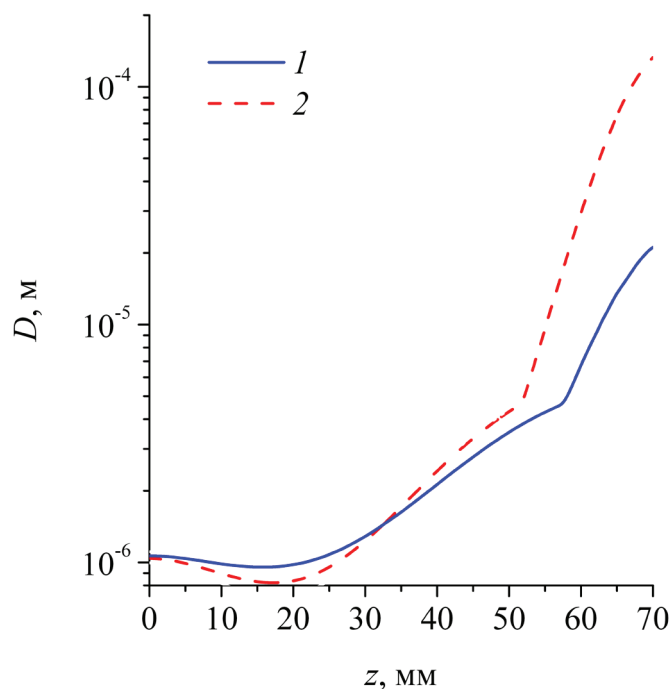


Рис. 7. Распределение размера рекристаллизованного зерна по длине активной зоны катода при  $r = R_1 + \delta/2$ :  
1 – для  $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$ ,  $t = 75 \text{ с}$ ; 2 – для  $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$ ,  $t = 54 \text{ с}$

Fig. 7. Distribution of the size of the recrystallized grain along the length of the cathode at  $r = R_1 + \delta/2$ :  
1 – is for  $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$ ,  $t = 75 \text{ s}$ ; 2 – is for  $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$ ,  $t = 75 \text{ s}$

ваться и охлаждаться, что не учтено в сделанных расчетах. Время одного цикла работы плазмотрона может превысить время первичной рекристаллизации (см. рис. 5) для отдельных участков катода (см. рис. 2), что приведет к росту зерна в результате собирательной и/или вторичной рекристаллизации [25]. Естественно, чем меньше размер зерна после первичной рекристаллизации (см. рис. 7), тем больше движущая сила собирательной и/или вторичной рекристаллизации. С учетом того, что меньший размер зерна и меньшее время первичной рекристаллизации соответствуют более высоким температурам, собирательная и/или вторичная рекристаллизация в этих областях будет протекать с повышенной скоростью. В результате вариация среднего размера зерна по длине катода будет существенно уменьшена. Для плотности потока тепла при  $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$  расчет показывает среднее по длине катода значение размера первично рекристаллизованного зерна 3,7 мкм, а при  $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$  – 14 мкм. Эти значения хорошо согласуются с рис. 8. При длительной работе плазмотрона собирательная и/или вторичная рекристаллизация приводят к образованию монокристаллической по толщине стенки полого катода [12], пример показан на рис. 9.

Время собирательной рекристаллизации  $\tau_{\text{CR}}$ , необходимое для получения монокристаллической стенки, может быть рассчитано по формуле (6). В этом случае следует принять, что  $D_0 = D(\tau_R)$ ,  $D_{\max} = \delta$ ,  $K_0 = 4K_G(D_0 D_{\max})^{0.5}$ ,  $K_G = K_{\text{GCR}} = 0,079 \text{ м/с}$ ,  $\Delta H = \Delta H_{\text{CR}} = 385,2 \text{ кДж/моль}$  [25].

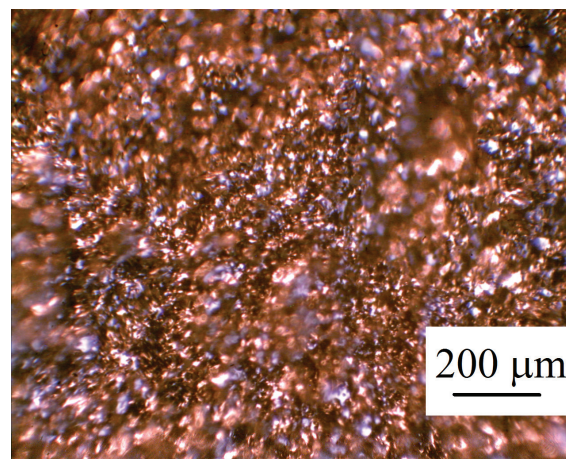
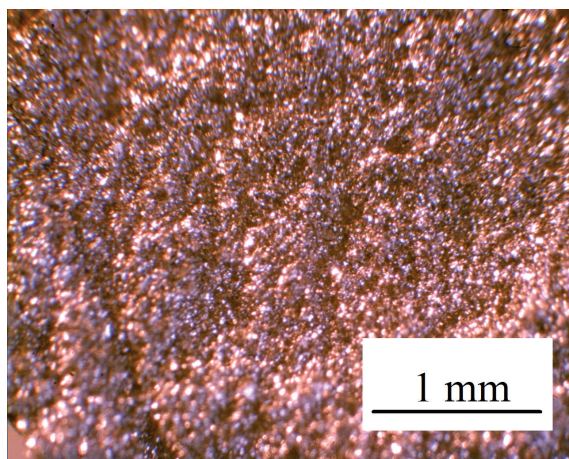


Рис. 8. Фотография излома катода плазмотрона на длине 50 мм

Fig. 8. Photo of the plasmatron cathode fracture at a length of 50 mm



Это время получается много больше времени ресурса работы плазматрона и не соответствует экспериментальным данным, представленным на рис. 9. Полученные результаты экспериментов (см. работу [25]) показывают, что из-за наличия примесей в вольфраме значительно чаще возникает вторичная рекристаллизация, скорости которой существенно больше. В этом случае  $K_G = K_{GSR} = 63$  м/с,  $\Delta H = \Delta H_{SR} = 360,1$  кДж/моль [25]. Распределение  $\tau_{SR}$  по длине активной зоны катода, рассчитанное по уравнению (6), показано на рис. 10.

Видно, что полная рекристаллизация зерна в вольфрамовом катоде может происходить за один цикл работы плазматрона. Это означает, что электрофизические характеристики катода могут существенно меняться в ходе его работы. В легированном вольфраме процессы рекристаллизации идут со скоростями в 10 раз меньшими [25, 26], что может на порядок увеличить  $\tau_{SR}$ . При относительно быстром охлаждении катода разница температур по его длине остается существенной, и возникающие термические напряжения могут вызвать новый процесс рекристаллизации катода в следующем цикле работы плазматрона.

С учетом сделанных при расчетах предположений и неоптимизированного набора параме-

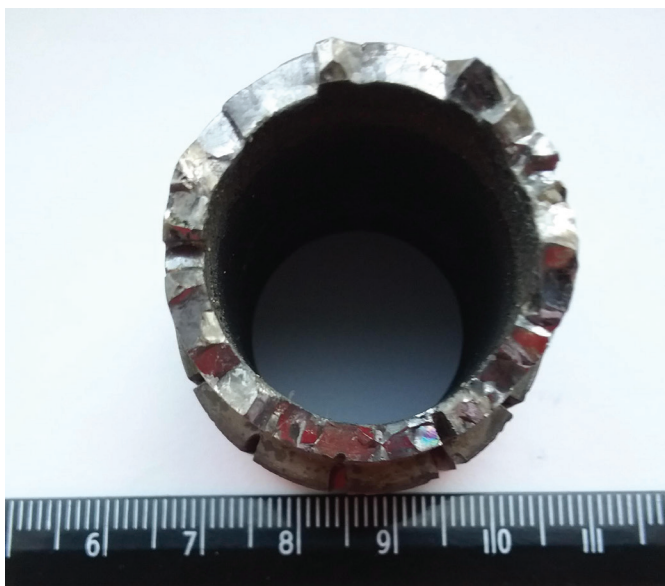


Рис. 9. Фотография излома катода плазматрона с монокристаллической стенкой

Fig. 9. Photo of the plasmatron cathode fracture with a single crystal wall

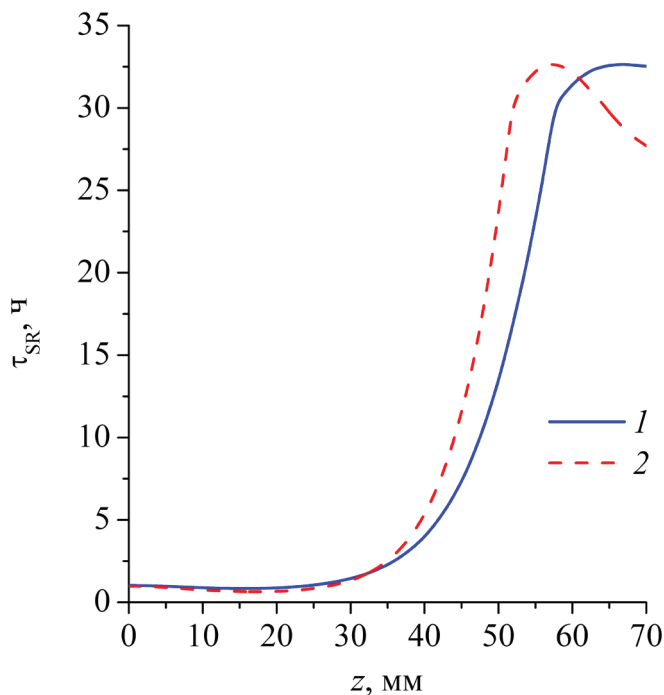


Рис. 10. Распределение максимального времени вторичной рекристаллизации по длине активной зоны катода при  $r = R_1 + \delta/2$ :

1 – для  $q_{\max} = 2,5$  МВт/м<sup>2</sup>,  $t = 75$  с; 2 – для  $q_{\max} = 3,5$  МВт/м<sup>2</sup>,  $t = 54$  с

Fig. 10. Distribution of the maximum time of the secondary recrystallization along the length of the cathode active zone at  $r = R_1 + \delta/2$ :

1 – is for  $q_{\max} = 2.5$  MW/m<sup>2</sup>,  $t = 75$  s; 2 – is for  $q_{\max} = 3.5$  MW/m<sup>2</sup>,  $t = 75$  s

тров модели для материала конкретного катода сравнение с имеющимися экспериментальными данными показывает, что полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными.

## Заключение

Предложены математические модели, на основе которых проведено численное моделирование различных режимов работы полого катода, получено пространственное изменение температуры в объеме катода при его нагреве под воздействием электрической дуги и оценено изменение структуры материала. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что данные модели можно использовать для исследования и повышения эксплуатационных характеристик полых катодов вакуумных плазматронов.

## Список литературы

1. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: проблемы и перспективы / Г.Ю. Даутов, А.Н. Тимошевский, Б.А. Урюков и др.; отв. ред. В.М. Фомин, И.М. Засыпкин. – Новосибирск: Наука, 2004. – 464 с. – (Низкотемпературная плазма; т. 20).
2. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / М.Ф. Жуков, Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, 1995. – 304 с.
3. *Peregudov V.S.* Optimization of the process of plasma ignition of coal // *High Temperature*. – 2009. – Vol. 47, N 2. – P. 181–186. – doi: 10.1134/S0018151X09020059.
4. Pulverized coal plasma gasification / R. Kalinenko, A. Kuznetsov, A. Levitsky, V. Messerle, Yu. Mirokhin, L. Polak, Z. Sakipov, A. Ustimenko // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1993. – Vol. 13, N 1. – P. 141–167. – doi: 10.1007/BF01447176.
5. *Blackburn P.R.* Ignition of pulverized coal with arc-heated air // *Journal of Energy*. – 1980. – Vol. 4, N 3. – P. 98–99. – doi: 10.2514/3.62464.
6. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, A.S. Askarova, A.O. Nagibin // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2010. – Vol. 17, N 3. – P. 435–444. – doi: 10.1134/S0869864310030145.
7. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment / K. Moustakas, D. Fatta, S. Malamis, K. Haralambous, M. Loizidou // *Journal of Hazardous Materials*. – 2005. – Vol. 123, N 1–3. – P. 120–126. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.038.
8. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review / E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Vocaccini // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 161, iss. 2–3. – P. 614–626. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.017.
9. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашов, С.П. Ващенко, Г.И. Багрянцев, Х.С. Пак // *Экология и промышленность России*. – 2005. – № 11. – С. 4–9.
10. Плазмотроны. Исследования. Проблемы / М.Ф. Жуков, А.Н. Тимошевский, С.П. Ващенко, И.М. Засыпкин, В.П. Лукашов, В.С. Перегудов, Б.И. Михайлов, Т.С. Мельникова, Б.А. Поздняков. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. – 203 с.
11. *Delcroix J.L., Trindade A.R.* Hollow cathode arcs // *Advances in Electronics and Electron Physics*. – 1974. – Vol. 35. – P. 87–190. – doi: 10.1016/S0065-2539(08)60281-4.
12. *Чередниченко В.С., Юдин Б.И.* Вакуумные плазменные электропечи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 586 с. – (Современные электротехнологии; т. 10).
13. *Ferreira C.M., Delcroix J.L.* Theory of the hollow cathode arcs // *Journal of Applied Physics*. – 1978. – Vol. 49, N 8. – P. 2380–2395. – doi: 10.1063/1.325126.
14. *Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г.* Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 508 с.
15. *Чередниченко В.С.* Сильноточные вакуумные дуги с полым катодом. Тепловое поле катода // *Известия СО АН СССР. Серия технических наук*. – 1987. – № 7, вып. 2. – С. 91–96.
16. *Чередниченко В.С., Галкин С.Г., Косинов В.А.* Сильноточные дуги с полым катодом // *Генерация потоков электродуговой плазмы*. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. – С. 306–322.
17. *Highly ionized hollow cathode discharge / L.M. Lidsky, S.D. Rothleder, D.J. Rose, S. Yoshikawa, C. Michelson, R.J. Mackin* // *Journal of Applied Physics*. – 1962. – Vol. 33, N 8. – P. 2490–2497. – doi 10.1063/1.1729002.
18. *Гужков В.В., Козлов Н.П., Хвесьюк В.И.* Экспериментальное исследование баланса токов и энергии в полым катодом // *IV Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам: тезисы докладов*. – М.: ВНИИЦ, 1978. – С. 261–262.
19. *Чередниченко В.С., Косинов В.А.* Дуговой разряд с полым катодом // *Известия СО АН СССР. Серия технических наук*. – 1980. – № 13, вып. 3. – С. 22–30.
20. *Еременко Г.П., Юдин Б.И., Чередниченко М.В.* О взаимодействии плазмы с внутренней поверхностью полого катода вакуумного плазмотрона // *Автоматизированные электротехнологические установки: сборник научных трудов*. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – С. 29–34.
21. Низкотемпературная плазма. Т. 11. Математическое моделирование катодных процессов / А.М. Зимин, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, В.И. Хвесьюк. – Новосибирск: Наука, 1993. – 194 с.
22. *Самарский А.А.* Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
23. *Кондратьев Н.С., Трусов П.В.* Механизмы образования зародышей рекристаллизации в металлах при термомеханической обработке // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2016. – № 4. – С. 151–174.
24. *Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В.* Металловедение вольфрама. – М.: Металлургия, 1978. – 257 с.
25. *Засимчук Е.Э., Исайчев В.И.* Кинетика первичной, вторичной и собирательной рекристаллизации в вольфрамовой проволоке // *Металлофизика*. – Киев: Наукова думка, 1970. – Вып. 31. – С. 56–60.

26. *Klopp W.D., Raffo P.L.* Effects of purity and structure on recrystallization, grain growth, ductility, tensile, and creep properties of arc-melted tungsten. – Washington: National aeronautics and space administration, 1964. – 50 p. – (NASA technical note; NASA TN D-2503).

27. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Наука, 1967. – 389 с.

28. Низкотемпературная плазма. Т. 12. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их

применение для модифицирования металлов и сплавов / В.П. Сабуров, А.Н. Черепанов, М.Ф. Жуков, Г.В. Галевский, Г.Г. Крушенко, В.Т. Борисов. – Новосибирск: Наука, 1995. – 344 с.

29. *Самсонов Г.В.* Свойства элементов. – М.: Металлургия, 1976. – 312 с.

30. Self-diffusion in tungsten / J.N. Mundy, S.J. Rothman, N.Q. Lam, H.A. Hoff, L.J. Nowicki // *Physical Review B*. – 1978. – Vol. 18, N 12. – P. 6566–6575. – doi 10.1103/PhysRevB.18.6566.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Modeling of the Thermal and Structural States of Hollow Cathode of Vacuum Plasmatron

Olga Dutova<sup>1, a,\*</sup>, Andrey Shishkin<sup>1, b</sup>, Vladimir Cherednichenko<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0001-5366-8010>, [odutova@ngs.ru](mailto:odutova@ngs.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-5431-0077>, [andrshi@itp.nsc.ru](mailto:andrshi@itp.nsc.ru),

<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0002-4844-5928>, [bm@skbterm.ru](mailto:bm@skbterm.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 14 November 2017

Revised: 12 January 2018

Accepted: 08 February 2018

Available online: 15 March 2018

#### Keywords:

Plasmatron

Cathode

Temperature field

Recrystallization

Grain size

### ABSTRACT

**Introduction.** Arc plasmatrons are widely used in various fields of science and technology. The resource of continuous work of electrodes determines the efficiency of plasmatron and is one of its most important technological characteristics. A theoretical and experimental study of physical and mechanical processes in cathode material is focused on increasing the duration of its running time and is a relevant objective. **The purpose of the work** is the creation of physical and mathematical models and numerical study of thermal and recrystallization processes occurring in the hollow cathode of a vacuum plasmatron under the influence of an electric arc. **Experimental Technique.** To study the temperature field of a cathode under the action of an electric arc, the Fourier differential equation with an internal heat source, Laplace equation for the electric potential, and Ohm's law equation were solved jointly. When the plasmatron is operating, new nuclei are formed and grow in the cathode. Three interrelated phenomena are most important for recrystallization: material heating, new grain nucleation and growth. The distribution of crystalline grain size over the cathode volume was calculated based on the temperature field data and activation model parameters of grain nucleation and growth for tungsten. The proposed mathematical models allow simulating the various modes of hollow cathode operation, evaluating the change in the structure of a material during its heating, and can be used to study and improve the performance characteristics of the hollow cathodes of vacuum plasmatrons. **Results and Discussion.** The obtained solutions showed that the high heating rates and rapid output to stationary mode characterize the cathode heating. It should be noted there is a sharp change in temperature along the cathode length in the area of the active zone (heating surface). The temperature distribution shows the considerable axial and radial temperature gradients, which can lead to large thermal stresses in the cathode. Calculation showed when the superheating over the temperature of recrystallization starts decreasing, the grain size increases. This is due to the fact that when the superheating grows, the nucleation rate outstrips the rate of grain growth, and the grain size decreases. For the investigated flux density values, the size of the primary recrystallized grain, average along the cathode length, is in the range of 3.7–14 μm. The time required to obtain a single-crystal wall of the hollow cathode due to collective and/or secondary recrystallization is 1–32 hours. As a result, complete recrystallization of the grain in the cross-section of tungsten cathode can occur in one cycle of plasmatron operation. This means that the electro-physical and thermal characteristics of the cathode change significantly during its operation. Also the grain size has a significant effect on the resistance to the destructive effects of thermal stresses.

**For citation:** Dutova O.S., Shishkin A.V., Cherednichenko V.S. Modeling of the thermal and structural states of hollow cathode of vacuum plasmatron. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 55–68. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-55-68. (In Russian).

### References

1. Fomin V.M., Zasyarkin I.M., eds. *Generatsiya nizkotemperaturnoi plazmy i plazmennye tekhnologii: problemy i perspektivy* [Generation of low-temperature plasma and plasma technologies: problems and prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 464 p.

#### \* Corresponding author

Dutova Olga S., Ph.D. (Physics and Mathematics), Scientific associate  
 Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,  
 1, Ac. Lavrentieva ave.,  
 630090, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel: 8 (383) 333-10-96, e-mail: [odutova@ngs.ru](mailto:odutova@ngs.ru)



2. Zhukov M.F., Karpenko E.I., Peregudov V.S., Messerle V.E. *Plazmennaya bezmazutnaya rastopka kotlov i stabilizatsiya goreniya pyleugol'nogo fakela* [Plasma without oil firing of boilers and stabilization of combustion of a pulverized-coal torch]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 304 p.
3. Peregudov V.S. Optimization of the process of plasma ignition of coal. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 181–186. doi: 10.1134/S0018151X09020059.
4. Kalinenko R., Kuznetsov A., Levitsky A., Messerle V., Mirokhin Yu., Polak L., Sakipov Z., Ustimenko A. Pulverized coal plasma gasification. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1993, vol. 13, no. 1, pp. 141–167. doi.org/10.1007/BF01447176.
5. Blackburn P.R. Ignition of pulverized coal with arc-heated air. *Journal of energy*, 1980, vol. 4, no. 3, pp. 98–99. doi: 10.2514/3.62464
6. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Askarova A.S., Nagibin A.O. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 435–444. doi: 10.1134/S0869864310030145.
7. Moustakas K., Fatta D., Malamis S., Haralambous K., Loizidou M. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, vol. 123, no. 1–3, pp. 120–126. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.038.
8. Gomez E., Amutha Rani D., Cheeseman C.R., Deegan D., Wise M., Boccaccini A.R. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, iss. 2–3, pp. 614–626. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.017.
9. Lukashov V.P., Vashchenko S.P., Bagryantsev G.I., Pak Kh.S. Plazmotermicheskaya pererabotka tverdykh otkhodov [Plasma-thermal processing of solid waste products]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2005, no. 11, pp. 4–9.
10. Zhukov M.F., Timoshevskii A.N., Vashchenko S.P., Zasyplin I.M., Lukashov V.P., Peregudov V.S., Mikhailov B.I., Mel'nikova T.S., Pozdnyakov B.A. *Plazmotrony. Issledovaniya. Problemy* [Plasma torches. Research. Problems]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1995. 203 p.
11. Delcroix J.L., Trindade A.R. Hollow cathode arcs. *Advances in electronics and electron physics*, 1974, vol. 35, pp. 67–190. doi: 10.1016/S0065-2539(08)60281-4.
12. Cherednichenko V.S., Yudin B.I. *Vakuumnye plazmennye elektropechi* [Vacuum plasma electric furnaces]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 586 p.
13. Ferreira C.M., Delcroix J.L. Theory of the hollow cathode arcs. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 8, pp. 2380–2395. doi: 10.1063/1.325126.
14. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. *Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 508 p.
15. Cherednichenko V.S. Sil'notochnye vakuumnye dugi s polym katodom. Teplovoe pole katoda [High-current vacuum arcs with a hollow cathode. The thermal field of a cathode]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of technical sciences*, 1987, no. 7, iss. 2, pp. 91–96.
16. Cherednichenko V.S., Galkin S.G., Kosinov V.A. Sil'notochnye dugi s polym katodom [High-current arcs with hollow cathode]. *Generatsiya potokov elektrodugovoi plazmy* [Generation of electric arc plasma flows]. Novosibirsk, Institute of Thermophysics SB AS USSR Publ., 1987, pp. 306–322.
17. Lidsky L.M., Rothleder S.D., Rose D.J., Yoshikawa S., Michelson C., Mackin R.J. Highly ionized hollow cathode discharge. *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 8, pp. 2490–2497. doi: 10.1063/1.1729002.
18. Guzhkov V.V., Kozlov N.P., Khvesyuk V.I. [Experimental study of the balance of currents and energy in a hollow cathode]. *IV Vsesoyuznaya konferentsiya po plazmennym uskoritelyam i ionnym inzhektoram: tezisy dokladov* [4th All-Union Conference on Plasma Accelerators and Ion Injectors: abstracts]. Moscow, VNTITs Publ., 1978, pp. 261–262. (In Russian).
19. Cherednichenko V.S., Kosinov V.A. Dugovoi razryad s polym katodom [Arc discharge with a hollow cathode]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of technical sciences*, 1980, no. 13, iss. 3, pp. 22–30.
20. Eremenko G.P., Yudin B.I., Cherednichenko M.V. O vzaimodeistvii plazmy s vnutrennei poverkhnost'yu pologo katoda vakuumnogo plazmotrona [On the interaction of plasma with the inner surface of the hollow cathode of a vacuum plasmatron]. *Avtomatizirovannye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Automated electrotechnological installations]. Novosibirsk, Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ., 1991, pp. 29–34.

21. Zimin A.M., Nazarenko I.P., Panevin I.G., Khvesyuk V.I. *Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 11. *Matematicheskoe modelirovanie katodnykh protsessov* [Low temperature plasma. Vol. 11. Mathematical modeling of cathode processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993. 194 p.
22. Samarskii A.A. *Vvedenie v chislennye metody* [Introduction to numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 288 p.
23. Kondrat'ev N.S., Trusov P.V. Mekhanizmy obrazovaniya zarodyshei rekristallizatsii v metallakh pri termomekhanicheskoi obrabotke [Nucleation recrystallization mechanisms in metals at thermomechanical processing]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 151–174.
24. Savitskii E.M., Povarova K.B., Makarov P.V. *Metallovedenie vol'frama* [Metallurgy of tungsten]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 257 p.
25. Z asimchuk E.E., Isaichev V.I. Kinetika pervichnoi, vtorichnoi i sobiratel'noi rekristallizatsii v vol'framovoi provoloke [Kinetics of primary, secondary and collective recrystallization in a tungsten wire]. *Metallofizika* [Metallophysics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970, iss. 31, pp. 56–60.
26. Klopp W.D., Raffo P.L. *Effects of purity and structure on recrystallization, grain growth, ductility, tensile, and creep properties of arc-melted tungsten*. NASA TN D-2503. Washington, National aeronautics and space administration, 1964. 50 p.
27. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 389 p.
28. Saburov V.P., Cherepanov A.N., Zhukov M.F., Galevskii G.V., Krushenko G.G., Borisov V.T. *Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 12. *Plazmokhimicheskii sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modifitsirovaniya metallov i splavov* [Low temperature plasma. Vol. 12. Plasma-chemical synthesis of ultradisperse powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 344 p.
29. Samsonov G.V. *Svoistva elementov* [Properties of elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 312 p.
30. Mundy J.N., Rothman S.J., Lam N.Q., Hoff H.A., Nowicki L.J. Self-diffusion in tungsten. *Physical Review B*, 1978, vol. 18, no. 12, pp. 6566–6575. doi: 10.1103/PhysRevB.18.6566.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).