

УДК 537.533

doi 10.18101/978-5-9793-0803-6-163-166

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ КАТОДА ПЛАЗМОТРОНОВ

© *Аветян Мактах Арсеновна*, аспирант
Института физического материаловедения СО РАН
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: magdaavetian@mail.ru

© *Цыдыпов Балдандоржо Дашиевич*, доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник Института физического материаловедения СО РАН
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: tsydyrovbd@rambler.ru

В работе даны результаты математического моделирования теплофизического состояния сильноточных катодных узлов с активированной вольфрамовой вставкой. Поставлена и решена нелинейная тепловая задача в двумерном приближении для составного осесимметричного катодного узла с произвольными значениями длины вылета тугоплавкой вставки из обоймы. При этом учтены локальное джоулево тепловыделение в объеме электрода, конвективная и радиационная составляющие сложного теплообмена на его поверхности, нелинейные зависимости тепло- и электрофизических характеристик материалов конструкции от температуры. Показано, что расчет теплофизического состояния катодного узла без учета этих факторов приводит к значительным погрешностям в определении температурного поля катода. Подробно исследованы влияние геометрических размеров катодного узла, рабочих токов, параметров теплообмена и условия охлаждения на термический режим электрода.

Ключевые слова: тепловой режим, катодный узел, плазмотрон, низкотемпературная плазма, плотность тока.

HEAT MODE OF THERMIONIC CATHODE PLASMATRONS

Maktakh A. Avetyan, Postgraduate Student at the Institute
of Physical Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russia

Baldandorzhо D. Tsydyrov, Doctor of Engineering Sciences,
Leading Researcher at the Institute of Physical Material Science, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russia

The article gives the results of mathematical modeling of thermophysical state of high-current cathode assemblies with activated tungsten insert. The nonlinear thermal problem in the two-dimensional approximation for the axially symmetric composite cathode assembly with arbitrary values of the length of the overhang refractory insertion of the cage has been posed and solved. Wherein local Joule heat in the bulk of the electrode, convective and radiative heat transfer components of the complex on its surface, non-linear dependence of the thermal and electrical characteris-

tics of the materials of construction of the temperature have been considered. It is shown that the calculation of thermophysical state cathode assembly without these factors leads to significant errors in the determination of the temperature field of the cathode. The effect of the geometric dimensions of the cathode assembly, operating currents, the parameters of heat transfer and cooling conditions on the thermal regime of the electrode have been studied in detail.

Keywords: heat mode, cathode assembly, plasmatron, low-temperature plasma, current density.

В настоящее время в различных областях науки и техники широко применяются генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны). Как показывает практика, ресурс работы сильноточных плазмотронов с термоэмиссионными твердотельными катодами в основном определяется тепловым режимом функционирования катодных узлов [1; 2]. В статье приведены результаты решения краевой теплофизической задачи для сильноточного катодного узла цилиндрической симметрии с граничными условиями, адекватными условиям работы реальных конструкций [3]. В частности, в модели тепловой поток из плазмы разряда $q_0=F(r)$ представлен в виде распределения Гаусса, что соответствует экспериментальным результатам [4]. В предшествующей работе [5] тепловой поток аппроксимировался упрощенной ступенчатой функцией Хевисайда.

Строгий расчет стационарного температурного поля в катодном узле состоит в совместном решении уравнений теплопроводности и неразрывности тока с нелинейными краевыми условиями [3]:

$$\nabla(\lambda_k \nabla T_k) + q_J = 0, \quad \nabla(\sigma_k \nabla U_k) = 0,$$

где λ_k, σ_k — теплопроводность и электропроводность катода ($k=1$) и обоймы ($k=2$), зависящие от температуры; T_k, U_k — температура и потенциал электрического поля; $q_J = \sigma_k \mathbf{E}_k^2 = \sigma^{-1} \mathbf{j}_k^2$ — мощность джоулевой диссипации энергии; $\mathbf{E}_k = \nabla U_k$ — вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{j}_k = \sigma_k \mathbf{E}_k$ — вектор плотности тока.

Рассмотрим температурное поле в зависимости от линейных размеров катода в составном электродном узле плазмотрона, представляющем собой стержень из легированного вольфрама, запрессованного в корпус медной обоймы (рис. 1). Геометрические размеры и теплоэлектрофизические свойства материалов конструкции следующие: $L_2=1,5$ см; $L_h=1$ см; $d_2=3$ см; $\lambda_1=118$ Вт/м·К; $\lambda_2=352$ Вт/м·К; $c_1=130$ Дж/кг·К; $c_2=380$ Дж/кг·К; $\varepsilon_1=0,3$; $\alpha_g=370$ Вт/м²·К; $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴. Плотности материалов электрода и обоймы равны соответственно $1,9 \cdot 10^4$ кг·м⁻³ и $8,93 \cdot 10^3$ кг·м⁻³. Давление рабочего газа аргона — $P=10^5$ Па. В расчетах длина вылета L_c и диаметр катода d_1 варьировались в пределах 0—6 см и 0,4—1 см соответственно. Значения интегрального теплового потока Q и радиуса катодного пятна r_0 взяты из экспериментальных данных работы [2].

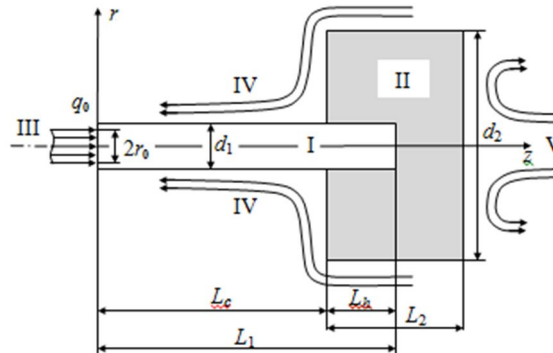


Рис. 1. Схема составного катодного узла плазменных устройств.
 I — катод (вставка), II — корпус узла (обойма), III — плазма разряда,
 IV — плазмообразующий газ, V — теплоотвод (жидкость)

Кривые, представленные на рисунке 2, наглядно иллюстрируют термическое состояние рабочей поверхности электрода в зависимости от длины вылета L_c . Увеличение L_c в пределах 0—6 см приводит к нелинейному изменению температуры горячего торца. Температура в пятне сначала уменьшается от 3 659 ($L_c = 0$) до $\sim 2 700$ К, затем, начиная с $L_c \geq 2$ см, плавно повышается до 3 164 К ($L_c = 6$ см). Одновременно с этим уровень температур в других точках торца монотонно возрастает. Это приводит, как и в случае увеличения токовой нагрузки, к выравниванию температурного профиля торца и увеличению среднего уровня температуры катода. Такой характер изменения профиля температуры связан с действием джоулева тепловыделения в объеме вставки. При малых значениях L_c его вклад в энергобаланс катода незначителен, но с увеличением длины вставки доля объемного источника тепла возрастает.

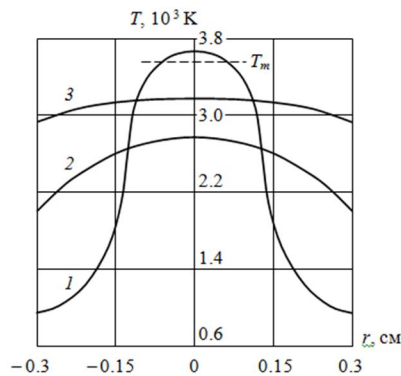


Рис. 2. Зависимость температуры рабочего торца от длины вылета катода.
 T_m — температура плавления W, $d_1 = 0,6$ см, $I = 400$ А, 1 — $L_c = 0,2$ см,
 2 — $L_c = 1,2$ см, 3 — $L_c = 6$ см

Экспериментально показано [2], что тепловой поток, поступающий в электрод, большей частью отводится через боковую поверхность вставки. Этот факт подтверждается результатами расчетов. Увеличение диаметра медной обоймы d_2 значительно снижает уровень всего поля температур вставки за исключением температуры в пятне. Увеличение длины обоймы L_2 при $L_h = const$ ведет к росту уровня температурного поля катода, особенно на поверхностях контакта двух металлов. Это сопровождается большим нагревом меди, что может привести к прогоранию конструкции.

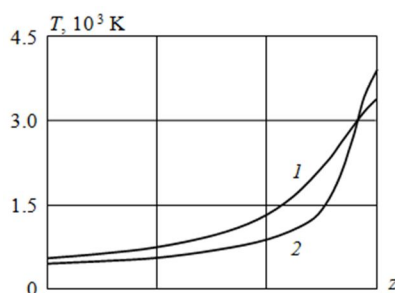


Рис. 3. Зависимости осевых температур от диаметра катода.
 $I = 500$ А, $L_h = 1$ см, 1 — $d_1 = 0,5$ см, 2 — $d_1 = 1$ см

Сравнение осевых распределений температур для катода при $L_c = 0$ показало, что уменьшение d_1 (рис. 3) значительно снижает температуру в пятне разряда, но при этом увеличивается температура в месте спаивания двух металлов. Однако, варьируя геометрические размеры катодного узла, прежде всего отношение d_1/d_2 для заданной токовой нагрузки, можно найти оптимальный температурный режим функционирования катода.

Литература

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV / под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2000. С. 153–459.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков [и др.]. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
3. Аветян М. А., Цыдыпов Б. Д. К расчету теплового состояния составного катодного узла плазменных устройств // Наноматериалы и технологии: тр. V Всерос. конф. Улан-Удэ, 2014. С. 185–189.
4. Экспериментальное исследование системы «прикатодная плазма — вольфрамовый катод» в сильноточных азотных дугах атмосферного давления / А. А. Белевцев, С. В. Горячев, Э. Х. Исакаев, В. Ф. Чиннов // ТВТ. 2013. Т. 51, № 5. С. 652–662.
5. Цыдыпов Б. Д., Симаков И. Г. Тепловое состояние катодных узлов сильноточных плазменных систем // ТВТ. 2011. Т. 49, № 5. С. 663–670.