

УДК 621.316.933.064.4

МОДЕЛИ КАТОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ЭМИССИИ ЧАСТИЦ
С ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.И.Милых, профессор, д-р техн. наук,

Т.П.Павленко, доцент, канд. техн. наук

(НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,

e-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, тел.+380577076514)

Показаны модели, с помощью которых можно проводить оценочные расчеты катодных процессов на контактах электрических аппаратов, на основе уравнений теплопроводности и неразрывности плотности тока, с учетом явлений эмиссии частиц в ионизированном слое и пространственного заряда. Полученные соотношения позволяют определить температуру на поверхности и внутри катода электрического контакта, а также долю ионного тока и напряженность электрического поля.

Ключевые слова: электрический контакт, электрический аппарат, эмиссия частиц, катодный процесс.

MODELS OF PROCESSES OF CATHODES TAKING INTO ACCOUNT
EMISSION OF PARTICLES FROM THE SURFACE OF CONTACT OF
ELECTRIC VEHICLE

V. Milykh., prof., dr. of tech. sc., T. Pavlenko, associate prof., cand. of tech. sc.

NTU “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, Ukraine,

E-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, tel. +380577076514)

Models by which it is possible to conduct the calculations of evaluations of processes of cathodes on the contacts of electric vehicles are shown, on the basis of equalizations of heat conductivity and indissolubility of closeness of current, taking into account the phenomena of emission of particles in the ionized layer and spatial charge. The got correlations allow to define the amount

of heat, temperature on a surface and into the cathode of electric contact, and also stake of ionic current and tension of the electric field.

Keywords: electric contacts, electric vehicle, emission of particles, cathode process.

Введение. Катодные процессы на контактах электрических аппаратов представляют собой взаимосвязанную замкнутую систему явлений, протекающих как в прикатодной области, так и на поверхности и в теле самого катода электрического контакта. Особое влияние на протекание катодных процессов оказывает не только электрическая дуга и плазменные потоки, но и различные виды эмиссий, сопровождающихся движением и образованием заряженных частиц в прикатодных областях и в столбе дуги [1–2].

Необходимым условием поддержания разряда является существование ионного тока, разогревающего катод электрического контакта. При напряженностях (10^7 – 10^8 В/см) [2] становится значительной вероятность туннельного проникновения электронов сквозь потенциальный барьер. Такой механизм называется автоэлектронным (холодная эмиссия), а плотность тока определяется формулой Фаулера-Нордгейма:

$$j_a = a \frac{E^2}{\varphi} \exp \left[- \frac{b \varphi^{\frac{3}{2}}}{E} \theta(\alpha) \right],$$

где $a = e^2 / 8\pi m$, $b = (8\pi / 3n) \sqrt{2n}$ – параметры катода; e – заряд электрона; m , n – масса и концентрация частиц; $\alpha = \sqrt{eE} / \varphi$ – температурный коэффициент; E – напряженность электрического поля вблизи поверхности катода; φ – работа выхода электронов с поверхности; $\theta(\alpha)$ – функция Нордгейма, аппроксимированная выражением:

$$\theta(\alpha) = 1 - \alpha^2 \left\{ 1 - 0,85 \sin\left(\frac{1-\alpha}{2}\right) \right\}.$$

Но с увеличением скорости движения катодных пятен по рабочей поверхности электрических контактов, а также с увеличением температуры и образованием плазменных потоков электрической дуги автоэлектронная эмиссия постепенно переходит в разряд термоэлектронной эмиссии.

Целью работы является анализ модели, с помощью которой можно показать расчет основных параметров процесса термоэмиссии, таких как: плотности тока эмиссии, напряженности поля, температуры на поверхности электрического контакта с учетом влияния теплового потока на эмиссию электронов с поверхности катода электрического контакта.

Анализ результатов исследования. Процесс перехода одного вида эмиссии в другой довольно таки сложен и мало кто из авторов это объясняет. Обзор работ [1–4] показывает, что над расплавленным составом композиции электрических контактов находится слой газа, обладающий металлической проводимостью, и сжатый до высоких давлений. Под действием определенного вида энергии (электрической или тепловой) электроны пытаются занять состояния выше уровня Ферми на атомном остове, с которых затем осуществляется ряд эмиссий, а именно, авто – и термоэлектронная эмиссии [5,6]. Благодаря эмиссиям электрон ионизируется электрическим полем, покидает уровень Ферми, иными словами, преодолевает потенциальный барьер и уходит в ионизированную часть столба дуги. На атомный остов поступает новый электрон и т.д. механизм повторяется. Этот механизм может использоваться для объяснения взрывной эмиссии потоков электронов с поверхности электрического контакта.

Процесс взрывной эмиссии можно представить следующим образом.

При работе коммутационного электрического аппарата на поверхности контактов появляются микровыступы, что приводит к неоднородному распределению электрического потенциала.

В самой острой точке микровыступа создается сильное электрическое поле, приводящее к стеканию с острия в плазму большого автоэлектронного тока, плотность которого может достигать 10^8 - 10^9 А/см². Взрывное испарение микроострия за счет значительного джоулева тепловыделения приводит к резкому усилению тока. При этом число электронов, переносимых в импульсе, в 10-1000 раз превышает число атомов в плазменном потоке, что вызвано дальнейшим усилением электрического поля под влиянием образующейся плазмы электрической дуги.

Потоки плазмы, возникающие в прикатодной области электрических контактов, являются неравновесными. В результате температура электронов в этой области по сравнению с температурой тяжелых ионов может изменяться в широких пределах, что определяется концентрацией и температурой более холодных ионов, т.е. $T_e \gg T_i$.

При построении модели, в качестве определяющих величин могут быть: ток дуги, давление и свойства плазмообразующего газа, форма, свойства состава композиции электрических контактов и условия охлаждения поверхности катода электрического контакта. Искомыми характеристиками прикатодной области электрического контакта являются: поле температур поверхности катода электрического контакта, подводимые и отводимые потоки тепла, катодное падение потенциала, плотность тока и доля ионного тока.

Для определения процессов внутри катода электрического контакта предлагается решение уравнений:

– уравнение теплопроводности с учетом джоулева тепловыделения:

$$\rho_k c_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_k \operatorname{grad} T) + j^2 / \sigma_k = 0; \quad (1)$$

– уравнение неразрывности плотности тока:

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

где $\rho_k, c_k, \lambda_k, \sigma_k$ – соответственно плотность, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность композиции катода электрического контакта; t – время нагрева поверхности катода электрического контакта; j – плотность тока на поверхности катода электрического контакта.

Граничными условиями для уравнений (1)–(2) являются условия теплообмена и теплопереноса на поверхности катода электрического контакта, а также симметрии на его оси.

Поток тепла в катодном пятне привязки дуги на поверхности катода электрического контакта:

$$q = j_i (\alpha_i U_k + U_i - \varphi_{y\delta}) + \left[(j_{e\hat{y}\delta} - j_{e\hat{y}\delta}) \cdot \left(\varphi_{y\delta} + \frac{2kT_e}{e} \right) \right] + q_{\text{æñ}},$$

где j_i – плотность тока ионов; α_i – коэффициент аккомодации ионов; U_k – катодное падение потенциала; U_i – энергия ионизации; $\varphi_{y\delta}$ – эффективная работа выхода электронов; $j_{e\hat{y}\delta} = \frac{en_e}{4} \langle v_e \rangle \exp(-eU_k/kT_e)$ – плотность тока обратных электронов; n_e – концентрация электронов; $\langle v_e \rangle = \sqrt{8kT_e / \pi m_e}$ – тепловая скорость электронов; k – постоянная Больцмана; T_e – температура электронов на границе катодного падения потенциалов; m_e – масса электрона; $j_{e\text{эм}}$ – плотность тока за счет эмиссии электронов; $q_{\text{æñ}}$ – энергия, передаваемая катоду при рекомбинации атомов в молекулу.

Плотность тока на поверхности катода:

$$j = j_i + j_{e\hat{y}\delta} - j_{e\hat{y}\delta}.$$

В прикатодной области из-за малой ее протяженности показанные уравнения обычно используют в одномерном приближении для разных областей.

Для области, где не происходят столкновения пространственных зарядов, уравнения имеют вид:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{e}{r_{\hat{i}}} (n_i - n_e), \quad (3)$$

$$m_{e,i} \nu_{e,i} \frac{d\nu_{e,i}}{dx} = \mp eU, \quad (4)$$

$$j_e = en_e \nu_e; \quad j_i = en_i \nu_i, \quad (5)$$

где U – падение напряжения в бесстолкновительной области; x – протяженность области; r_o – радиус при невозмущенном состоянии плазмы (радиус Дебая); $m_{e,i}$, $\nu_{e,i}$ – масса и средняя скорость электронов и ионов; j_e – плотность тока электронов.

Данные приближенные соотношения справедливы для определения параметров электронов и ионов в области пространственного разряда. Впервые данная система (3)–(5) была решена Маккоуном, в результате чего получена формула, определяющая напряженность электрического поля вблизи поверхности контакта:

$$E^2 = \frac{16}{r_{\hat{i}}} \left[\left(\frac{m_i}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} j_i - \left(\frac{m_e}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} j_e \right] U_k^{\frac{1}{2}}.$$

Для области ионизационного слоя систему уравнений можно представить в виде:

– уравнения скорости ионизации и рекомбинации частиц разного сорта:

$$\frac{d\Phi_i}{dx} = -\frac{d\Phi_e}{dx} = \frac{d\Phi_a}{dx} = k_I n_e n_a + k_r n_e^3,$$

где $\Phi_i = n_i v_i$; $\Phi_e = n_e v_e$; $\Phi_a = n_a v_a$ – скорости ионизации и рекомбинации ионов, электронов и атомов; k_I, k_r – коэффициенты ионизации и рекомбинации частиц в дуговом столбе; n_e, n_a – концентрация электронов и атомов при ионизации и рекомбинации в дуговом столбе;

– уравнение массы и скорости частиц разного сорта:

$$m_s v_s \frac{dv_s}{dx} = l_s E + \frac{1}{n_s} \frac{dp_s}{dx} + \sum_{l \neq s} M_{sl} v_{sl} (v_s - v_l),$$

где s, l – условные обозначения частиц в ионизированном слое разного сорта (электронов, ионов и атомов); m_s, v_s – масса и скорость частиц разного сорта; l_s – распределение частиц разного сорта; n_s – концентрация частиц разного сорта состава композиции электрических контактов; M_{sl} – приведенная масса частиц разного сорта; p_s – парциальное давление в ионизированном слое с концентрацией частиц разного сорта; v_{sl} – частота соударений частиц разного сорта; v_s, v_l – скорость частиц разного сорта состава композиции электрических контактов;

– уравнение теплопроводности частиц разного сорта с учетом концентрации, температуры и доли распределения энергии:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT_e}{dx} \right) = \left(U_I + \frac{3}{2} k T_e \right) \frac{d}{dx} (n_e v_e) + \frac{3}{2} n_e k \sum_s \gamma_{es} v_{es} (T_e - T_s) + \frac{3}{2} n_e k T_e \frac{dv_e}{dx} - n_e \sum_s v_{es} \frac{m_e m_s}{m_e^2 + m_s^2} (v_e - v_s)^2, \quad s = i, a;$$

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_s \frac{dT_s}{dx} \right) = -\frac{3}{2} \gamma_{es} n_s v_{es} k (T_e - T_s),$$

где парциальное давление, концентрация частиц:

$$p = k \sum_s n_s T_s; \quad s = e, i, a; \quad n_e = n_i = n, \quad n_i v_i = n_a v_a,$$

где λ – коэффициент теплопроводности состава композиции катода

электрических контактов; U_I – падение напряжения ионизированного слоя; γ_{es} – доля энергии, передаваемой при столкновении частиц разного сорта; ν_{es} – частоты столкновений электронов, атомов, ионов ($\nu_{ei}, \nu_{ea}, \nu_{ia}$); ν_e, ν_i, ν_a – скорость электронов, ионов, атомов.

Тогда общая плотность тока на поверхности катода электрических контактов сильноточных коммутационных аппаратов с учетом ионизированного слоя определяется как:

$$j = en_e \nu_e + en_i \nu_i = const .$$

Вывод. С помощью показанных моделей, определения основных параметров столба дуги, можно выполнять оценочные расчеты катодных процессов как внутри тела катода электрических контактов на основе уравнений теплопроводности и неразрывности плотности тока, так и в разных областях прикатодной зоны с учетом явлений эмиссии частиц в слое пространственного заряда и ионизированном слое. В результате таких расчетов можно определить плотность тока поверхности катода электрических контактов и напряженность электрического поля. Полученные соотношения позволяют определить количество тепла и температуру на поверхности и внутри катода электрического контакта, что дает возможность подбора элементов такой композиции, которая удовлетворяла бы основным техническим условиям и могла работать в определенных условиях окружающей среды.

Список литературы

1. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. Низкотемпературная плазма. Ч.1 // Теория столба электрической дуги.– Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.– 373 с.
2. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах.–Новосибирск: Наука, 1982. –185 с.
3. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.–М.: Энергия, 1978.– 456 с.

4. Игнатко В.П., Кухтиков В.А. Исследование эрозионных процессов в условиях сильноточной квазистационарной дуги. – Сб. Сильноточные электрические контакты. Киев: Наукова думка, 1972.
5. Павленко Т.П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала // Електротехніка і Електромеханіка, № 1. – Харьков, 2009. –С. 25–28.
6. Павленко Т.П. Динамика развития дугового разряда // Електротехніка і Електромеханіка, №3, –Харьков, 2005. –С.38–41.