

ны и применяемых материалов. С практической точки зрения оптимальной является тепловая модель, в которой все параметры могут быть взяты из паспорта электродвигателя или получены путем геометрических измерений непосредственно на машине.

К несомненным достоинствам метода ЭТС относятся: возможность использования при различных конструктивных исполнениях двигателей, возможность повышения точности расчета за счет увеличения числа элементов схемы замещения и уточнения значений тепловых проводимостей.

Таким образом, анализ существующих методов теплового расчета частотно-регулируемых асинхронных двигателей, оценка их соответствия и адекватности реалиям сегодняшнего производства, позволяет сделать вывод о целесообразности и эффективности применения метода ЭТС при оценке теплового состояния электрической машины.

Список литературы: 1. *Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 2. *Сипайлов Г.А., Санников Д.Н., Жадан В.А.* Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1980. 3. *Петрушин В. С.* Асинхронные короткозамкнутые двигатели в системах полупроводникового электропривода. – О.: Одесса 1997. 4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике: – М.: Мир, 1975.

Поступила в редколлегию 05.05.08

УДК 621.316.933.064.4

Т.П. ПАВЛЕНКО, канд. техн. наук

АНАЛИЗ ПРИКАТОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭМИССИИ

У роботі розглянуті процеси у приелектродних областях електричних контактів, зокрема, розвиток катодних плям і утворення ерозії на його робочій поверхні. Мікроструктура контактної матеріалу є композицією, що складається з різних компонентів. Тому, зміна фазового складу, процесу дифузії, що супроводжується виникненням вакансій, дислокацій, дефектів кристалічної решітки необхідно розглядати з точки зору не тільки теорії твердого тіла, але і термоемісійних процесів.

В работе рассмотрены процессы в приелектродных областях электрических контактов, в частности, развитие катодных пятен и образование эрозии на его рабочей поверхности. Микроструктура контактного материала представляет собой композицию, состоящую из различных компонентов. Поэтому, изменение фазового состава, процесса диффузии, который сопровождается возникновением вакансий, дислокаций, дефектов кристаллической решетки, необходимо рассматривать с точки зрения не только теории твердого тела, но и термоэмиссионных процессов.

Введение и актуальность работы. Применение новых материалов в различных электротехнических устройствах является актуальным, т.к. это дает улучшение параметров и характеристик срабатывания различных систем и уменьшение массогабаритных показателей конструкций, экономии энергоресурсов.

Как известно, основным узлом электрических аппаратов является контактная система. Учитывая основные требования к электрическим аппаратам, и в частности к контактам, многие исследователи идут по пути создания таких новых материалов, где бы применялись недорогостоящие, нетоксичные компоненты.

Процессы, как на поверхности, так и внутри контактных композиций очень сложны и разнообразны, которые очень влияют на характер и степень эрозии рабочей поверхности. За последние годы опубликовано много работ, посвященных теории развития катодных процессов дугового разряда на рабочей поверхности электрических контактов. Работы ведутся в направлениях как уменьшения действия процесса эрозии, так и более рационального использования серебра в контактах.

Таким образом, на основании общего подхода к исследованию прикатодных областей с учетом ряда допущений и поставленных определенных задач можно определить распределение параметров по длине прикатодной зоны, ее размер, катодное падение потенциала, температурное поле катода и т.п. Катодные процессы представляют собой взаимосвязанную замкнутую систему явлений, протекающих в прикатодной области, на поверхности и в теле самого контакта. Поэтому, для повышения дугостойкости контактной композиции, необходимо

определить параметры, которые влияют на износ рабочей поверхности контакта.

Цель работы – анализ износа рабочей поверхности контактов в прикатодных областях.

Анализ процессов на контактах. Основным источником энергии, вызывающим эрозию контактов в дуговом разряде, являются приэлектродные области, особенно прикатодные, поскольку анодные процессы играют значительно меньшую роль в процессе поддержания дуги и, соответственно, меньшую роль в эрозии контактной поверхности.

Характерной особенностью дугового разряда является существование катодного пятна в прикатодной области, причем, эрозия контакта определяется типом пятна, воздействующего на поверхность.

Различные типы катодных пятен существуют одновременно, количественные соотношения между ними определяются материалом катода – температурой плавления и испарения; фазой разряда – начало, конец; длительностью и величиной протекающего тока; внешними условиями. Распад элементарного катодного пятна сопровождается колебанием напряжения и тока дуги, поэтому исследование спектров низкочастотных колебаний является вопросом исследования катодных процессов дуговых и искровых разрядов. Зная спектр низкочастотных колебаний напряжения или тока дуги, можно определить соотношение между различными видами пятен и рассчитать макроскопические параметры разряда.

Развитие различного рода пятен также зависит от микроструктуры контактного материала. Контактный материал представляет собой композицию, состоящую из различных компонентов, которые имеют свою кристаллическую структуру.

Исходя из положений теории твердого тела, можно сказать, что, к сожалению, в большинстве свойства кристаллов связаны с нарушением периодичности строения кристаллической решетки при воздействии каких-то факторов.

Реальные кристаллы содержат не только дефекты, но и дислокации, которые нарушают правильное чередование атомных плоскостей. Поле внутренних напряжений при дислокации равно:

$$\sigma_{ij} \sim \frac{G \cdot b}{2\pi \cdot r} \quad (1)$$

где r – расстояние в кристаллах; b – длина вектора Бюргерса (геометрическая характеристика дислокаций); G – модуль сдвига.

Энергия дислокационной петли радиуса R определяется следующим выражением:

$$E = \frac{G \cdot b^2 \cdot R}{2(1-\nu)} \cdot \left(\ln \frac{8R}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона; a – радиус обращения дислокаций ($a \approx 2-3b$).

Появление неравновесных дефектов решетки в кристалле и эволюция его дефектной структуры определяется характером воздействия на кристалл внешних источников энергии: механических, электрических, магнитных и т.д. Кристалл аккумулирует энергию внешнего источника в виде кинетической энергии

колебаний решетки и упругой энергии ее искажений, вызванных появлением дефектов. Возникающая при внешнем воздействии дефектная структура зависит не только от этого воздействия, но и типа решетки, вида межатомного воздействия, а также от свойств дефектов и их комплексов. В результате, образованные вакансии, междоузельные и внедренные атомы перемещаются диффузионно, т.е. происходят термоактивируемые скачки на межатомное расстояние.

Но энергия от внешнего источника влияет не только на показанные выше процессы. Изменение состояния кристаллической решетки поверхности может происходить под действием температуры и за счет термоэмиссионных процессов.

Анализ уравнений термоэлектронной эмиссии дает возможность определения теплофизических процессов на границе катод-плазма, сопровождающихся плавлением и испарением материала катода.

Для решения уравнений принимается ряд допущений:

- температурные режимы катодного пятна рассчитываются с учетом поверхностного источника теплового потока;
- элементарные процессы рассматриваются в динамике, т.к. инерционность теплофизических процессов намного выше инерционности эмиссионных процессов;
- учитываются зависимости от времени только для теплофизических процессов.

С учетом принятых допущений тепловой поток бомбардировки катода ионным током равен:

$$q_i = \mu(1 + \eta + \nu) \psi j_e U_k,$$

где μ – коэффициент аккомодации электронов; η – коэффициент, учитывающий влияние ионной температуры плазмы; ν – коэффициент, учитывающий энергию возбуждения рекомбинированного иона; $\psi = j_e / j_i$ – соотношение между электронной и ионной составляющими плотностей тока, которое определяется с помощью уравнения Маккоуна:

$$\psi = \frac{1}{(m_i / m_e)^{1/2}} \left(1 + \frac{E_k^2}{7,57 \cdot 10^5 U_k^{1/2} j_e} \right), \quad (3)$$

где m_e / m_i – отношение масс ионов и электронов; E_k – напряженность поля у катода; U_k – катодное падение потенциалов.

Исходя из условий теплообмена и теплопереноса на поверхностях катода, а также в пятне привязки дуги, поток тепла определяется как:

$$q = j_i (\alpha_i U_k + U_i - \Phi_{\text{эф}}) + j_e^{\text{обр}} \left(\Phi_{\text{эф}} + \frac{2kT_e}{e} \right) - j_{\text{эм}} \left(\Phi_{\text{эф}} + \frac{2kT_e}{e} \right) + q_{\text{дис}}, \quad (4)$$

где U_i – энергия ионизации; $\Phi_{\text{эф}}$ – эффективная работа выхода электронов; $j_e^{\text{обр}}$ – плотность тока обратных электронов; k – постоянная Больцмана; T_e – температура электрона; e – заряд электрона; $j_{\text{эм}}$ – плотность тока эмиссии;

$q_{\text{дис}}$ – энергия, передаваемая катоду при рекомбинации атомов в молекулу.

Тепловой поток резистивного нагрева расплавленной зоны металла, отнесенный к единице площади катодного пятна равен:

$$q_v = (X - X_0) \frac{j^2}{\sigma},$$

где $X - X_0$ – глубина плавления металла, которая определяется как:

$$X - X_0 = \frac{\varepsilon}{q_i - q_e + q_v} u(t^*) = \frac{\varepsilon}{q_0} u(t^*),$$

где X_0 – перемещение поверхности катодного пятна за счет испарения

$$\varepsilon = \lambda_1 (T_k - T) \left[1 + \frac{L_0}{L + c(T - T_{ko})} \right]; \sigma = \frac{\sigma^*}{\left[1 + \frac{2}{3} \alpha (T_k - T) \right]}$$
 – электропроводность

материала катода; σ^* – электропроводность при температуре плавления; $j = j_e + j_i$ – плотность тока в катодном пятне; λ_1 – теплопроводность жидкого металла; T – температура плавления материала; L_0 – скрытая теплота парообразования; L – скрытая теплота плавления; c – удельная теплоемкость материала; T_{ko} – начальная температура катода; q_e – эмиссия электронов за счет теплового потока, $q_e = (\varphi - 3,8 \cdot 10^{-4} E_k^{1/2} + 1,742 \cdot 10^{-4} T_k) j_e$; $u(t^*)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий изменение величины расплавленной зоны во времени; q_0 – коэффициент, учитывающий нагрев, плавление, испарение материала катода; α – температурный коэффициент.

Для ионизационного слоя систему уравнений можно представить в виде:

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

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

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

$$s = i, \quad a; \quad \frac{d}{dx} \left(\lambda_s \frac{dT_s}{dx} \right) = -\frac{3}{2} \gamma_{es} n_s v_{es} k (T_e - T_s); \quad p = k \sum_s \dot{a}_s n_s T_s; \quad s = e, i, a;$$

$$n_e = n_i = n, \quad n_i v_i = n_a v_a; \quad j = e n_e v_e + e n_i v_i = const, \quad (5)$$

где $\Phi_i = n_i v_i$; $\Phi_e = n_e v_e$; $\Phi_a = n_a v_a$ – скорости ионизации и рекомбинации иона, электрона и атома; k_I, k_r – коэффициенты ионизации и рекомбинации частиц; m_s – масса частицы; v_s – скорость частиц; M_{sl} – приведенная масса

частиц; v_{sl} – частота соударений частиц сорта s с частицами сорта l ; v_e, v_i, v_a – скорость электронов, ионов, атомов; γ_{es} – доля энергии, передаваемой при столкновении частиц; p_e, p_i, p_a – парциальные давления электронов, ионов, атомов; v_{ei}, v_{ea}, v_{ia} – частоты столкновений электронов, ионов, атомов; U_I – потенциал ионизации частиц; T_s – температура частиц.

Напряженность электрического поля вблизи поверхности:

$$E^2 = \frac{16}{r_0} \left[\left(\frac{m_i}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} j_i - \left(\frac{m_e}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} j_e \right] U_k^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где r_0 – радиус поверхности.

Плотность тока электронной эмиссии j_e для высокотемпературной области катодного пятна описывается уравнением термоавтоэлектронной эмиссии:

$$j_e = 120 T_k^2 \frac{1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} T_k}{\sin 1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} T_k} \exp \left(\frac{4,39 E^{1/2} - 1,16 \cdot 10^4 e\varphi}{T_k} \right), \quad (7)$$

где T_k – температура поверхности катодного пятна; $e\varphi$ – работа выхода электронов.

Вывод. Таким образом, можно сказать, что износ рабочей поверхности контактов и значительное уменьшение его эрозии зависит от многих факторов. В данном случае, с учетом неоднородности поверхности катода, обмен энергиями между тепловым колебанием решетки и системой электронов зависит от объемно-структурных составляющих, энергетического уровня Ферми и величины энергетического поля. Равновесная концентрация дефектов в строении решетки при каждой температуре соответствует минимуму свободной энергии при этой температуре. Наличие дефектов в кристаллах приводит к изменению свойств композиции контактов.

Список литературы: 1. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела, Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 377 с. 2. Вейцман Э.В. Квазитонная теория межфазовой области раздела и ее приложения. Пер. с англ. – М: Энергоатомиздат. 1999. – 143 с. 3. Жуков М.Ф., Н.П. Козлов, А.В. Пустогаров. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. – Новосибирск: Наука, 1982. – 185 с.

Поступила в редколлегию 20.06.08