

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТОВ С УЧЕТОМ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ И ТЕРМОЭМИССИОННОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛА

Павленко Т.П., к.т.н, доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"

тел. (057) 707-64-84,

*Фізичні процеси на робочій поверхні контакту і усередині всієї композиції роблять істотний вплив на роботу всієї контактної системи. Аналіз взаємодії даних процесів з урахуванням властивостей контактної композиції завжди був актуальним. У даній роботі розглядається питання взаємодії потоків плазми з урахуванням термомісійної здатності матеріалу контакту.*

*Физические процессы на рабочей поверхности контакта и внутри всей композиции оказывают существенное влияние на работу всей контактной системы. Анализ взаимодействия данных процессов с учетом свойств контактной композиции всегда являлся актуальным. В данной работе рассматривается вопрос взаимодействия потоков плазмы с учетом термоэмиссионной способности материала контакта.*

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследователей рассматривают электрическую эрозию рабочей поверхности контакта как следствие термического эффекта, возникающего в межконтактном промежутке и на контактах в результате дугового разряда. Однако мало кто учитывает структуру разрядного канала, фазовый состав продуктов эрозии, дискретность и непрерывность процесса, эвакуацию металла с электродов, значение факельного компонента дуги и т.п.

В последнее время при теоретических и экспериментальных исследованиях дуговых катодов преобладает комплексный подход, заключающийся в совместном рассмотрении процессов в прикатодной области, на поверхности и в материале самого катода. К сожалению, во многих работах при теоретическом анализе не учитываются ряд процессов на катоде, которые могут существенно влиять на его работу. К ним следует отнести термоэмиссионную активность материала, химическое взаимодействие элементов с плазмообразующим газом, испарение, конденсация, поглощение и выделение газов, выход активирующих присадок, рекристаллизация, кристаллизация [1]

Кроме того, подвод энергии к эмитирующей поверхности катода может осуществляться за счет ионной бомбардировки, потока "обратных" электронов, излучения из плазмы, джоулева тепловыделения и нагрева от внешнего источника. Отвод энергии происходит, в основном, за счет эмиссионного охлаждения, теплопроводности, теплового излучения.

На основании общего подхода к исследованию катодных процессов с учетом ряда допущений можно найти распределение параметров по длине прикатодной зоны, ее размер, катодное падение потенциала, температурное поле катода и т.п.

Таким образом, катодные процессы представляют собой взаимосвязанную замкнутую систему явлений, протекающих в прикатодной области, на поверхности и в теле самого катода.

Целью данной работы является анализ взаимодействия физических процессов на рабочей поверхности контакта (катода) при возникновении потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала.

### АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процессы нагрева контактов происходят весьма неравномерно, что приводит к образованию катодных пятен различного типа. Быстрый нагрев катодного пятна приводит к значительным термоупругим напряжениям. Они вызывают взрывное разрушение рабочей поверхности контактов. Продукты этого разрушения уносятся потоками плазмы.

На поверхности контактов, содержащих компоненты с различными температурами кипения, потоки плазмы исходят из зерен тугоплавкого материала и стабилизируются парами легкоплавкого компонента (рис. 1).

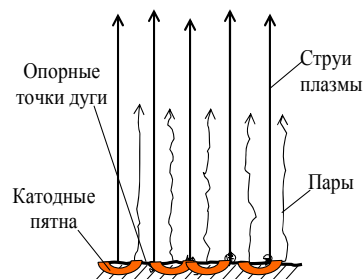


Рис. 1. Схема процессов, происходящих на поверхности электрических контактов

В зависимости от того, какую работу выхода будут иметь компоненты материала и будет зависеть движение дуги по рабочей поверхности.

С учетом различных факторов, влияющих на процесс движения электрической дуги можно решать ряд сложных и важных задач:

- оценка размеров основания электрической дуги на контактах;
- зависимость определяющих факторов износа поверхности контакта;
- закон изменения температуры основания дуги при охлаждении;
- влияние на процесс охлаждения оснований дуги остаточного столба дуги, имеющего высокую температуру и т.п.

К сожалению, в виду сложности данного явления и кратковременного его протекания не всегда удается

исследовать все факторы, хотя результаты испытания контактных материалов подтверждают влияние некоторых из них [1,2].

Исходя из того, что энергия к локальной поверхности электрода подводится из канала разряда, можно составить термодинамический баланс

$$\frac{dW}{dt} - \frac{dQ_{ГО}}{dt} = \frac{dQ_0}{dt}, \quad (1)$$

где  $\frac{dW}{dt}$  – изменение поверхностной энергии электрода при разряде;

$\frac{dQ_{ГО}}{dt}$  – теплоотдача за счет теплопроводности и излучения;

$\frac{dQ_0}{dt}$  – количество тепла, расходуемого в единицу времени на испарение некоторого объема металла.

Состояние, описываемое уравнением (1) соответствует термодинамическому равновесию, имеющему место при дуговом разряде, когда происходит испарение вещества с рабочей поверхности контакта.

Нагреваемый объем становится частью монолитного тела. Это приводит к метастабильному состоянию перегретого металла, которое при малейшем изменении взрывообразно испаряется. Иницированием такого элементарного взрыва могут служить как флуктуации плотности пара, так и колебания давлений в канале дуги.

В момент взрывного испарения металла образуется лунка на поверхности контакта. Бомбардировка лунки заряженными частицами прекращается, и канал дуги перескакивает на соседнюю область, где в новом объеме снова начинается процесс накопления внутренней энергии и при некотором критическом ее значении происходит следующий взрыв и т.д. В дальнейшем все эти лунки могут сливаться в одну, которая представляет собой интегральный эффект всего разряда.

Таким образом, можно сказать, что эмиссия паровой фазы вещества контакта путем последовательных взрывов элементарных объемов перегретого жидкого металла носит дискретный характер. Следующие при взрыве с каждого контакта друг за другом с большой частотой сгустки металла в квазипаровой фазе, удаляясь от электрода, расширяются, образуя струи и факелы паров.

Для вычисления массы паровой фазы, эмитированной при элементарном взрыве, необходимо знать толщину перегретого слоя, находящегося перед взрывом в метастабильном состоянии.

Исходя из того, что дуга создает на поверхности контакта плоский круглый источник тепла площадью  $\Delta S$  и, полагая поток тепла с этой площади нормальным с учетом отсутствия потоков тепла через боковую поверхность, получим в теле контакта цилиндрический объем с изотермами температур:  $T_k$  – перегретый слой поверхности (1);  $T_{пк}$  – жидкая фаза пятна (2);  $T_{пл}$  – плавление твердой фазы (3), (рис. 2).

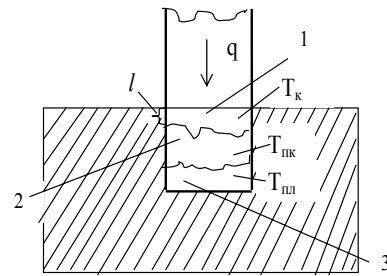


Рис. 2. Сечение цилиндрического объема: 1 – перегретый слой; 2 – жидкая фаза; 3 – твердая фаза

Зная длину  $l$  перегретого слоя и его площадь  $\Delta S$ , можно рассчитать величину перегретого объема  $\Delta V$ , взрывообразно превращающегося в пар при элементарном взрыве и соответствующую ему массу  $\Delta m$ :

$$l = \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $\bar{q}$  – эффективное значение теплового потока

$$\Delta V = \Delta S l = \pi r_0^2 \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус перегретого слоя поверхности;

$$\Delta m = \pi r_0^2 \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (4)$$

При испарении массы материала расходовалось тепло:

$$\Delta Q = \Delta m Q_0, \quad (5)$$

где  $Q_0$  – количество тепла, необходимое для нагревания единицы массы вещества до максимальной температуры перегрева с учетом теплоты фазовых превращений.

Но это же тепло, поступившее в объем  $\Delta V$ , также можно определить как:

$$\Delta Q = \bar{q} \Delta S \Delta t, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – время, необходимое для взрывообразного испарения массы материала, которое определяется как:

$$\Delta t = \lambda j \frac{T_k - T_{пк}}{q^2} Q_0, \quad (7)$$

где  $j$  – плотность тока.

Зная продолжительность разряда  $\tau$  можно рассчитать число элементарных взрывов за время разряда:

$$n = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{\bar{q}^2}{\lambda j Q_0 (T_k - T_{пк})}. \quad (8)$$

В механизме электрической эрозии контактных пар, периодически коммутирующих электрическую цепь, немалую роль играет внутренний источник тепла. Уравнение теплового баланса для замкнутых контактных пар может быть записано в следующем виде:

$$j^2 \rho dV = c j \frac{dT}{dt} + k_T (T - T_0) dS, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала контакта;  $c$  – теплоемкость материала;  $k_T$  – коэффициент тепло-

отдачи;  $T$ ,  $T_0$  – соответственно температура катода (контакта) и окружающей среды.

Левая часть представляет собой интенсивность выделения ленц-джоулева тепла в элементарном объеме  $dV$ , прилегающем к контактной области; первое выражение правой части – интенсивность накопления теплоты, второе – интенсивность теплоотдачи.

Рост температуры  $dT/dt > 0$  приводит к плавлению и взрывообразному испарению элементарных объемов  $dV$  материала контактов. В этот момент контакты отбрасываются, возникает дуговой разряд с вышеуказанными последствиями.

Если значение левой части превышает значение правой, то взрыв может не произойти. В этом случае металл в контактных точках только плавится, что способствует развитию мостиковой эрозии с переносом материала с одного контакта на другой.

Для оценки баланса энергии необходимо значение условий на поверхности привязки разряда и в зоне пространственного заряда, которые зависят от многих факторов: плазмообразующих потоков материала, геометрии и условий охлаждения катода, уровня тока, термоэмиссионной способности материала, рода давления газа и др. [3]

Оценка баланса энергии, на поверхности катода исходя из параметров теплопроводности, термоэмиссии и излучения представляет собой:

$$q_3 + q_e^k + q_\lambda = q_i + q_e^{\text{обр}} + q_R^{\text{пл}} + q_a, \quad (10)$$

где  $q_3$  – энергия, уносимая электронами эмиссии, которая зависит от плотности тока электронов при эмиссионном охлаждении;  $q_e^k$  – энергия теплового излучения с поверхности катода, которая зависит от рода материала, состояния поверхности, уровня температуры;  $q_\lambda$  – энергия, отводимая за счет теплопроводности в тело катода;  $q_i$  – энергия, приносимая ионами, которая зависит от плотности тока, потенциала ионизации, эффективной работы выхода электронов;  $q_e^{\text{обр}}$  – энергия, приносимая обратными электронами, которая зависит от плотности тока обратных электронов, температуры электронов на границе катодного падения потенциалов, концентрации электронов, тепловой скорости электронов, массы электронов;  $q_R^{\text{пл}}$  – подвод энергии за счет излучения плазмы, который зависит от объемного коэффициента изотропного излучения плазмы, от рода, давления, температуры плазмы, длины и радиуса столба дуги.

Данное выражение может быть дополнено уравнениями для полного тока, тока термоэмиссии обратных электронов, Маккоуна:

$$j = j_e^{\text{эм}} + j_i - j_e^{\text{обр}};$$

$$j_e^{\text{эм}} = A_0 T^2 \exp \left[ - \frac{e(\phi_{\text{эф}} - \sqrt{eE_k})}{kT} \right];$$

$$E_k^2 = 7,6 \cdot 10^5 U_k^2 \left\{ j_i \left( \frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} - j_e^{\text{эм}} \right\}, \quad (10)$$

где  $j_i$ ,  $j_e^{\text{эм}}$  – плотности токов ионов, электронов;  $j_e^{\text{обр}}$  – плотности токов обратных электронов;  $A_0$  – универсальная постоянная для всех металлов;  $\phi_{\text{эф}}$  – эффективная работа выхода электронов;  $E_k$  – напряженность электрического поля у гладкой поверхности катода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $U_k$  – катодное падение потенциала;  $m_i$ ,  $m_e$  – масса ионов, электронов.

Обзор работ [4, 5] показывает, что электроны под действием высокой температуры пара занимают состояние выше уровня Ферми, с которых затем осуществляется термоэлектронная эмиссия. Мощное джоулево тепловыделение обуславливает взрывное испарение микроострия, после которого наблюдается резкое усиление тока. При этом число электронов, переносимых в импульсе в 10-1000 раз превышает число атомов в плазменном ступке, что вызвано дальнейшим усилением электрического поля под влиянием образующейся плазмы. Прикатодная плазма не только не идеальна, но и существенно не равновесна.

## ВЫВОД

Из данного анализа взаимодействия физических процессов видно, что существенную роль играет взрывообразное испарение металла с контактной поверхности. Уменьшение эрозии можно достичь путем подбора контактного материала с большим значением полной теплоты испарения, коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и малой величиной удельного сопротивления. Но также необходимо учитывать движение плазменных потоков, которые могут изменять форму столба дуги с учетом термоэмиссионной активности частиц за счет увеличения поверхностной энергии, уменьшения давлений газа и металлического пара в межэлектродном промежутке.

Полученные оценочные расчеты позволяют определить параметры катодных процессов, которые влияют на скорость и время существования электрической дуги, что способствует динамике развития катодных пятен различного типа, которые и определяют эрозию контактной поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крыгина Т.П., Павленко Ю.П. Электрические контакты высокой эрозионной стойкости., Сб. научн. тр. "Низковольтные аппараты защиты и управления", - Харьков, ВНИИЭА, 1993. - С. 230-235.
- [2] Куляпин В.М., Галкин Н.И., Рыбаков О.Е., Печенкин А.И. Теория катодных процессов дугового разряда. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1978, № 1. - С. 82-85.
- [3] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В., Кучеров Я.Р. и др. Структура поверхности и работа выхода электронов дуговых электродов // Поверхность, 1985, № 11. - С. 74-78.
- [4] Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. - М.: Наука, 1973. - 479 с.
- [5] Энгельшт В.С. Математическое моделирование электрической дуги. - Фрунзе: Илим, 1983 – 361 с.

Поступила 25.04.2008