

УДК 621.9.048.4

Моделирование процесса электроэрозионного изнашивания электрода - инструмента при электроискровой обработке

Кузнецов Иван Сергеевич^{1,2}

ivan-654@yandex.ru

SPIN-код: 8833-2982

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россий² ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия

Аннотация. Представлена модель, имеющая вид аналитической математической зависимости, позволяющая прогнозировать один из важнейших параметров электроэрозионной и электроискровой обработки — массу материала, удаляемого с анода в процессе электрической эрозии за единичный искровой разряд. Аналитическая зависимость описывает процесс электрической эрозии, имеющей место при контакте анода и катода. Математическая модель устанавливает параметры, изменяя которые возможно управлять процессом эрозии, данными параметрами являются начальное напряжение, емкость конденсаторного блока, амплитуда и частота вибрации. Расхождение рассчитанных по формуле и экспериментальных значений массы составило не более 5 %.

Ключевые слова: электроискровая обработка, искровой разряд, анод, катод, масса электродного материала, напряжение, сопротивление, электрическая эрозия

Modeling the process of electro desor wear of an electrode - tool during electro spark machining

Kuznetsov Ivan Sergeevich^{1,2}

ivan-654@yandex.ru

SPIN-code: 8833-2982

¹ BMSTU, Moscow, Russia² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a model that has the form of analytical mathematical dependence, allowing to predict one of the most important parameters of electrical discharge and spark machining — the mass of material removed from the anode during electrical erosion for a single spark discharge. The analytical dependence describes the process of electrical erosion that occurs when the anode and cathode contact. The mathematical model sets the parameters, changing which it is possible to control the erosion process, these parameters are the initial voltage, the capacity of the capacitor block, the amplitude and frequency of vibration. The discrepancy between the calculated by the formula and the experimental values of the mass was no more than 5 %.

Keywords: electrical spark machining, spark discharge, anode, cathode, mass of electrode material, voltage, resistance, electrical erosion

Введение. Одним из перспективных способов получения покрытий является электроискровая обработка (ЭИО). В результате ЭИО на поверхности подложки образуется слой с измененной структурой и толщиной 10–500 мкм. Впервые физическая модель процесса ЭИО была предложена отечественными учеными — основоположниками данного метода — Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Позднее развитие представлений о методе ЭИО привело к разработке А.Д. Верхотуровым новой модели, отличающейся учетом кинетики процесса и поверхностных явлений, проходящих на аноде и катоде. В настоящее время в работах [1, 2] предложена качественная модель распространения энергии в материале при импульсном искровом воздействии, согласно которой одним из основных критериев оценки распространения тепловой энергии в материале является скорость распространения фононов. В работе [3] предложена математическая модель процесса низковольтного электроискрового легирования, которая позволяет контролировать изменение параметров и объяснить основные закономерности структурообразования наносимого материала. Недостатком выше представленных моделей является отсутствие физико-математической зависимости, позволяющей рассчитывать массу переносимого на катод материала с учетом фазовых превращений на электродах и тепловых констант электродных материалов.

Цель работы — разработать математическую модель массопереноса электродного материала в процессе ЭИО, позволяющую рассчитывать массу материала, удаляемого с анода.

Материалы и методы. Теоретические исследования строились на основных положениях теории искры, физики газового разряда и электротермической теории эрозии.

Результаты теоретических исследований. Для разработки модели электрической эрозии анода были проведены предварительные теоретические исследования. В работах [4, 5] осуществлена попытка теоретического определения скоростей дрейфа заряженных частиц между электродами при ЭИО. Установлена расчетная зависимость диаметра искрового разряда, от площади сечения электродов, напряжения и параметров газовой среды [4, 6]. Получены формулы позволяющие рассчитывать начальные боковые скорости заряженных частиц, среднюю концентрацию заряженных частиц в разряде и долю тепловой энергии, выделяемой на катоде [4, 7]. На основе выше описанных исследований и положения теории искры, можно утверждать, что величина тока, проходящего в цепи при искровом разряде в момент контакта электродов, зависит от сопротивления цепи и подводимой энергии от генератора импульсов. Формула Ромпе и Вайцеля для сопротивления искры в системе СИ:

$$R = h \left(\frac{2\alpha}{P_0} \int_0^{\tau} i^2 d\tau \right)^{-0,5} = 0,5 \frac{U_0}{E_{np}} \left(\frac{2\alpha}{P_0} \int_0^{\tau} i^2 d\tau \right)^{-0,5}, \quad (1)$$

где R — сопротивление, Ом; h — длина искрового промежутка, м; P_0 — давление среды, Па; i — ток, А; α — константа, характеризующая газ, $\alpha = 8-10 \text{ Па} \cdot \text{м}^2 / \text{В}^2 \cdot \text{с}$; E_{np} — напряженность электрического поля при пробое, В/м; U_0 — начальное напряжение генератора, подаваемое на электроды, В.

Вводя среднее значение тока за время сближения электродов, получим:

$$\int_0^{\tau} i^2 d\tau = i_{cp}^2 \tau_3, \quad (2)$$

где τ_3 — время сближения электродов до контакта, с; i_{cp} — средний ток в искровом канале.

Учитывая расчеты проведенные в работах [4–7] средний ток в искровом канале можно рассчитать по формуле:

$$i_{cp} = 0,33\pi D^2 \frac{U_0 P_0}{kT_0 E_{np}} (\bar{N}_e)_{\text{кон}}^{0,2} \frac{e}{\tau_p} + 0,25\pi D^2 \frac{U_0 P_0}{kT_0 E_{np}} \left(\frac{D}{w_{io} \tau_p} \right)^{0,25} \frac{e}{\tau_p}, \quad (3)$$

где D — средний диаметр искрового канала; k — постоянная Больцмана, Дж/Кл; T_0 — температура среды, К; $(\bar{N}_e)_{\text{кон}}$ — принятая точность для конечной относительной (по отношению к начальной) концентрации электронов [7]; e — заряд электрона, Кл; τ_p — длительность разряда, с; w_{io} — начальная боковая выносная скорость ионов в разряде, м/с.

Преобразовав формулу (5) суммарный ток в искровом канале рассчитать следующим образом:

$$i_{cp} = \pi D^2 \frac{U_0 P_0 e}{kT_0 P_0 \tau_p} \left[0,33 (\bar{N}_e)_{\text{кон}}^{0,2} + 0,25 \left(\frac{D}{w_{io} \tau_p} \right)^{0,25} \right]. \quad (4)$$

Пользуясь ранее проведенными расчетами, выражение в квадратных скобках формулы (6), при $D \approx 5 \cdot 10^{-6}$ м, $w_{io} \approx 1,15 \cdot 10^3$ м/с, $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-5}$ с, $(\bar{N}_e)_{\text{кон}} = 0,05$, равно 0,21. В итоге, формула (6) примет следующий вид:

$$i_{cp} = 0,21\pi D^2 \frac{U_0 P_0 e}{kT_0 E_{np} \tau_p}. \quad (5)$$

Подставив зависимость (5) в формулу (1), найдем:

$$R = 2,38 \frac{kT_0 \tau_p}{\pi D^2 e} (2\alpha P_0 \tau_3)^{-0,5} = 2,38 \frac{kT_0 \tau_p}{\pi \left(1,8 \cdot 10^7 \left(\frac{\varepsilon_0 S}{\pi e H} \right)^{-0,5} \right)^2 e} (2\alpha P_0 \tau_3)^{-0,5}. \quad (6)$$

Получим окончательную формулу для определения сопротивления:

$$R = 0,52 \cdot 10^{-14} \frac{HkT_0\tau_p}{S\varepsilon_0} (\alpha P_0\tau_3)^{-0,5}, \quad (7)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная, Кл²/Н·м²; S — поперечное сечение электрода (анода), м². Коэффициент H , учитывающий затрату энергии поля на диссоциацию молекул воздуха, может быть принят $H = 0,9 \cdot 10^{27}$ В/м³. Сопротивление искры, рассчитанное по формуле (10), при значении длительности разряда $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-5}$ с, амплитуде 0,5–1,0 мм, характеристики сопротивления искры $RS = (3,2–4,6) \cdot 10^{-3}$ Ом·м² сопротивление искрового канала составит 640–920 Ом.

Изменение напряжения при разряде конденсатора:

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{\tau}{RC}\right), \quad (8)$$

где C — емкость конденсаторной батареи вибратора, Ф.

Расчет по формуле (8), при $\tau = \tau_3$ и $C = 56$ мкФ, дает снижение напряжения $\bar{U} = U/U_0 \approx 0,98$, т. е. разряд конденсатора происходит преимущественно при контакте электродов.

Для нахождения массы материала, переносимого с анода на катод, найдем длительность контакта τ_k , снижение напряжения при контакте ΔU_k и расход энергии ΔQ_k . Расход энергии конденсатора при разряде в контакте:

$$\Delta Q_k = \frac{C}{2} (U_0^2 - U_k^2) = \frac{CU_0^2}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{2\tau_k}{CR_{\text{ц}}}\right) \right], \quad (9)$$

где U_k — остаточное напряжение генератора после контакта, В; $R_{\text{ц}}$ — сопротивление цепи при контакте электродов, Ом.

Снижение напряжения при контакте электродов:

$$\Delta U_k = U_0 - U_k = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{CR_{\text{ц}}}\right) \right] = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{C(R_{\text{пр}} + R_{\text{А}} + R_{\text{пл}} + R_{\text{ст}})}\right) \right], \quad (10)$$

где $R_{\text{пр}}$ — сопротивление проводов контактной цепи, Ом; $R_{\text{А}}$ — сопротивление электрода, Ом; $R_{\text{пл}}$ — сопротивление зоны плавления, Ом; $R_{\text{ст}}$ — сопротивление стягивания, Ом.

Потеря энергии конденсаторов при контакте:

$$\Delta Q_k = \frac{\tau_k}{R_{\text{ц}}} U_0^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{CR_{\text{ц}}}\right) \right]^2. \quad (11)$$

Из условия равенства значений (13) и (16) найдем величину относительного времени контакта $\tau_k/(CR_{\text{ц}}) = 1,043$. При этом снижение напряжения за время контакта по формуле (10) составит $\Delta U_k = 0,65U_0$, а ток $i_k = 0,65U_0/R_{\text{ц}}$. Общая потеря энергии в аноде:

$$\Delta Q_A = i_k^2 R_{\text{ц}} \tau_k = \left(0,65 \frac{U_0}{R_{\text{ц}}}\right)^2 R_A 1,043 CR_{\text{ц}} = 0,44 U_0^2 C \frac{R_A}{R_{\text{ц}}}. \quad (12)$$

При относительно невысоком нагреве анода энергия расходуется в основном на его нагрев, плавление и испарение материала в зоне контакта:

$$\Delta Q_A = \Delta Q_H + \Delta Q_{\text{п}} + \Delta Q_{\text{и}} = \left(C_A m_A (t_H - t_0) \frac{1}{f \tau_{\text{л}}} \right) + \quad (13)$$

$$+ (m_{\text{п}} [C_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_0) + L_{\text{п}}]) + (m_{\text{и}} [C_{\text{и}} (t_{\text{и}} - t_{\text{п}}) + L_{\text{и}}]),$$

где ΔQ_H — расход энергии на нагрев анода, Дж; $\Delta Q_{\text{п}}$ — расход энергии на плавление материала анода, Дж; $\Delta Q_{\text{и}}$ — расход энергии на испарение части расплавленного материала анода, Дж; C_A — удельная теплоемкость материала анода, Дж/(кг °С); m_A — масса анода, кг; t_H — температура нагрева анода, °С; t_0 — начальная температура анода, °С; f — частота подачи импульсов, Гц; $\tau_{\text{л}}$ — длительность обработки, с; $C_{\text{п}}$ — удельная теплоемкость материала в процессе плавления, Дж/(кг·°С); $m_{\text{п}}$ — масса расплавленного материала, кг; $t_{\text{п}}$ — температура плавления, °С; $L_{\text{п}}$ — теплота плавления, Дж/кг; $m_{\text{и}}$ — масса испарившегося материала, кг; $C_{\text{и}}$ — удельная теплоемкость материала в процессе испарения, Дж/(кг °С); $t_{\text{и}}$ — температура испарения, °С; $L_{\text{и}}$ — теплота испарения, Дж/кг.

Откуда теоретическая масса материала M_T (кг), удаляемая с анода за время одного контакта:

$$M_T = \frac{(\Delta Q_A - \Delta Q_H) \left(1 - \left(0,405 \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L_{\text{п}} + C_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_0)}{L_{\text{и}} + C_{\text{и}} (t_{\text{и}} - t_{\text{п}})} \right] \right\} \right) \right)}{C_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_0) + L_{\text{п}} + \left(0,405 \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L_{\text{п}} + C_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_0)}{L_{\text{и}} + C_{\text{и}} (t_{\text{и}} - t_{\text{п}})} \right] \right\} \right) [C_{\text{и}} (t_{\text{и}} - t_{\text{п}}) + L_{\text{и}}]} n \nu, \quad (14)$$

где n — коэффициент, учитывающий массу расплавленного материала, оставшегося на аноде при размыкании электродов; ν — коэффициент, учитывающий массу материала, потерянного на разбрызгивание и испарение при взрыве металлического мостика.

В ходе экспериментальных исследований массопереноса были выявлены зависимости массы электродного материала, переносимого с анода на катод,

от начального напряжения — одного из основных технологических параметров ЭИО. В диапазоне напряжений $U_0 = 0\text{--}80$ В расхождение аналитических и эмпирических значений составляла не более 5 %.

Анализируя экспериментальные данные кинетики массопереноса, следует отметить, что наибольшую массу, переносимую с анода на катод, имеют сплавы с наименьшей эрозионной стойкостью химического элемента — основы сплава.

Заключение. Математическая модель электрической эрозии анода в процессе ЭИО позволяет рассчитывать массу материала переносимого с анода на катод и управлять этим параметром посредством изменения начального напряжения, емкости конденсаторного блока, амплитуды, частоты вибрации и электродных материалов. Расхождение рассчитанных по формуле (14) и экспериментальных значений массы составило не более 5 %.

Список источников

- [1] Гордиенко П.С., Верхотуров А.Д., Достовалов В.А. Электрофизическая модель эрозии электродов при импульсном энергетическом воздействии. *Электронная обработка материалов*, 2011, т. 47, № 3, с. 15–27.
- [2] Верхотуров А.Д., Гордиенко П.С., Коневцов Л.А., Панин Е.С. Некоторые комментарии к обобщениям механизма электроискрового воздействия на материалы (К 100-летию Б.Р. Лазаренко). *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, 2010, № 1, с. 46–54.
- [3] Кондратьев А.И., Кочетова И.В., Химухин С.Н. Построение математической модели процесса электроискрового легирования. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2006, № 8 (20), с. 6–9.
- [4] Кузнецов И.С. *Электроискровая технология упрочнения деталей режущего аппарата жаток электродами из аморфных и нанокристаллических сплавов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2013, 16 с.
- [5] Павлов В.З., Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. Оценочные показатели электроискровой обработки при упрочнении и восстановлении деталей: скорость дрейфа заряженных частиц. *Тракторы и сельхозмашины*, 2012, № 7, с. 52–54.
- [6] Кузнецов И.С., Павлов В.З., Коломейченко А.В. Расчет размера искровых разрядов при электроискровой обработке деталей сельскохозяйственных машин. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 2012, № 7 (7), с. 13–15.
- [7] Коломейченко А.В., Павлов В.З., Кузнецов И.С. Оценка мощности поверхностных тепловых источников, возникающих при электроискровой обработке деталей машин. *Труды ГОСНИТИ*, 2013, т. 112, № 2, с. 143–149.