

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО УЧАСТКА ПРОВОЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ВЫРЕЗАНИИ

*Черкасский государственный технологический университет,
бульв. Шевченко, 460, г. Черкассы, 18005, Украина*

Введение

Широкое использование в экономических условиях стран СНГ сравнительно дешевых электроэрозионных вырезных проволочных станков, не комплектуемых системами автоматической заправки проволоки и адаптивного управления параметрами энерговыделения, делает весьма актуальным решение задачи безобрывной обработки. Ручная заправка проволоки после обрыва на 20 – 80% увеличивает время обработки, снижает точность и качество обработанных поверхностей. Простое уменьшение энергии, подаваемой в межэлектродный промежуток (МЭП), до уровня, обеспечивающего отсутствие обрывов, значительно снижает производительность резания. Рассмотрим вопрос подробнее.

В процессе электроэрозионного вырезания проволочный электрод–инструмент (ПЭИ) нагружен термически и механически. Известно [1], что температурное поле ПЭИ имеет две составляющие: постоянную, неподвижную, связанную с прохождением тока по электроду и интегральным действием разрядов (T_n), и переменную, подвижную, связанную с локальным действием разрядов и количеством разрядов в гнезде (гнездо – определенное количество последовательных пространственно локализованных разрядов).

В работах [2, 3] показано, что основной причиной обрыва ПЭИ является локальное тепловое действие гнезда разрядов, приводящее к нагреванию участка проволочного электрода и температуре, при которой усилие натяжения создает в проволоке напряжения, превышающие предел прочности материала ПЭИ. В режиме реального времени измерять распределение температуры в произвольном сечении ПЭИ практически невозможно. Это обусловлено как геометрическими размерами проволоки и МЭП, так и кратковременным воздействием теплового потока локально ограниченного гнезда разрядов. Одним из решений, позволяющих повысить производительность безобрывной обработки, является согласование локальной тепловой нагрузки, которая подается на ПЭИ, с возможностью среды удалить теплоту из промежутка. Решение данной задачи требует адекватного математического описания теплового состояния локального участка проволочного электрода, с помощью которого можно определить оптимальный с точки зрения максимальной производительности при безобрывной обработке электрический режим и постоянные времени работы генератора. С целью поиска условий, обеспечивающих повышение производительности и стабильности электроэрозионного вырезания, проведены теоретические исследования температурного режима локального участка проволоки.

Теоретический анализ

В общем случае баланс энергии единичного искрового разряда в МЭП можно представить в виде

$$E_{и} = E_{с} + E_{ар} + E_{ат} + E_{кр} + E_{кт} \quad (1)$$

где $E_{и}$ – полная энергия импульса; $E_{с}$ – энергия, которая выделилась в столбе разряда; $E_{ар}$, $E_{кр}$ – энергия, израсходованная на эрозионное разрушение материалов анода и катода; $E_{ат}$, $E_{кт}$ – энергия, отведенная в тело электродов за счет механизма теплопроводности.

Для оценки тепловой нагрузки на ПЭИ достаточно определить величину одной составляющей – $E_{кт}$. Действительно, из-за отсутствия контакта между деталью и ПЭИ $E_{ат}$ не будет влиять на тепловое состояние проволоки, струи пара удаленного материала электродов (факелы) отдают свою

энергию в основном рабочей жидкости, то есть для условий электроэрозионной проволочной резки факельным механизмом передачи энергии электродам можно пренебречь [4]. Нагревание рабочей жидкости учитывается коэффициентом теплоотдачи.

В зависимости от условий обработки (длительности импульса, амплитуды рабочего тока, материалов ПЭИ и детали, гидродинамических условий в локальной зоне МЭП) распределение энергии между составляющими уравнения (1) может существенно различаться. Так, при $E_{и} = 1 - 10$ мДж и продолжительности импульса $t_{и} = 1 - 5$ мкс $E_{кт}$ изменяется в диапазоне $\approx 0,08 - 0,35 E_{и}$ [4]. В дальнейшем при проведении расчетов будем пользоваться экспериментальными данными о значениях $E_{кт}$ [3].

Общий вид уравнения теплопроводности без учета подвижного источника энергии [5]

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(c\rho T) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T), \quad (2)$$

где ρ – плотность материала проволоки; c – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности.

Рассмотрим процесс как задачу о нагревании бесконечного цилиндра аperiодическим источником энергии в произвольной точке участка, выделенного на поверхности проволоки и охлаждении путем теплопроводности вглубь материала электрода и теплообмена с рабочей жидкостью (рис. 1). Поэтому вполне логично рассматривать тепловое поле в ПЭИ в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (3)$$

Начальные условия состоят в том, что в момент времени $\tau = 0$ известна функция $T(r, \theta, z, 0)$. Для рассматриваемой системы начальная температура ПЭИ равна $T_{п}$, следовательно, $T(r, \theta, z, 0) = T_{п} = \text{const}$ (при выполнении расчетов принимаем $T_{п} = 80^\circ\text{C}$ [2]).

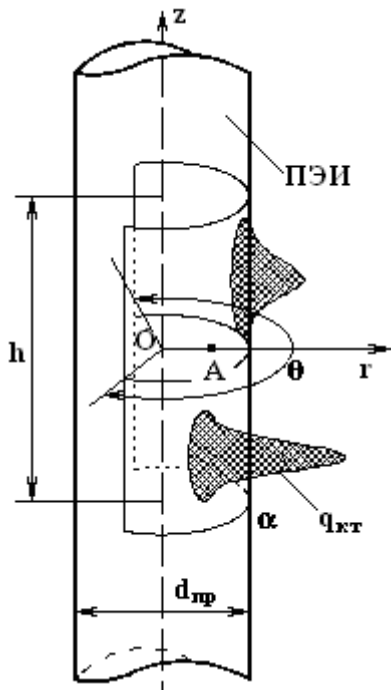


Рис. 1. Схема нагрева локального участка ПЭИ последовательной серией импульсов: $h=0,5$ мм – длина выбранного локального участка (длина зоны пластической деформации проволоки при обрыве); $\theta=240^\circ$ – угол, в пределах которого возможно возникновение разрядов на поверхности ПЭИ

Граничные условия – это те, которые определяют характер взаимодействия рассматриваемого объекта с окружающей средой. Для электроэрозионной вырезной обработки характерна форма лунки, близкая к кругу диаметром 50 – 100 мкм в зависимости от параметров рабочей жидкости, величины МЭП и энергетических показателей режима обработки.

Возьмем наиболее достоверную и принятую большинством исследователей процессов электроэрозионного разрушения материалов гипотезу о том, что тепловой поток вводится в тело электрода через поверхность, ограниченную площадью эрозионной лунки. Поступление энергии в ПЭИ происходит в момент прохождения разряда. В месте контакта плазмы с электродом на последний действует плоский источник энергии с распределением Гауссова типа и удельным тепловым потоком нагрева электрода, который представлен зависимостью

$$q_{кт} = \frac{E_{кт}}{\tau} \frac{1}{\sigma^2 \cdot 2 \cdot \pi} \exp \left(- \frac{(z - z_0)^2 + (\theta - \theta_0)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) \quad (4)$$

где τ – продолжительность импульса; σ – коэффициент кривой Гаусса, (99,7% площади кривой находится в границах $[-3\sigma; +3\sigma]$, $6\sigma = d_{пр}$); z_0, θ_0 – координаты центра катодного пятна на поверхности ПЭИ; $d_{пр}$ – диаметр ПЭИ.

Между поверхностью ПЭИ, которая не контактирует с плазмой канала разряда, и рабочей жидкостью происходит процесс теплоотдачи

$$q_{то} = \pm \alpha(T_s) \cdot (T_s - T_{cp}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К) (коэффициент теплоотдачи существенно зависит от гидродинамических условий в МЭП и температуры среды и поэтому рассчитывается в любой момент времени для каждой точки на поверхности проволоки [2]); T_s – температура поверхности ПЭИ в рассматриваемой точке; T_{cp} – температура среды.

Вне зоны локализации разрядов температура ПЭИ приближается к T_{II} , то есть

$$T|_{z \rightarrow \pm\infty} = T_{II}. \quad (6)$$

Исходя из этого, сформирована система дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат с начальными и граничными условиями, которая описывает распространение тепла в локальном участке ПЭИ:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ T(r, \theta, z, 0) = T_{II}; \\ q_{то}|_s = \pm \alpha(T_s) \cdot (T_s - T_{cp}); \\ q_{кт}|_s = \begin{cases} \frac{E_{кт}}{\tau} \frac{1}{\sigma^2 \cdot 2 \cdot \pi} e^{-\frac{(z-z_0)^2 + (\theta-\theta_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}}; & i \cdot T_{пер} \leq T \leq \tau + i \cdot T_{пер}; \\ 0; & \tau + i \cdot T_{пер} < T < (i+1) \cdot T_{пер}; \end{cases} \\ T|_{z \rightarrow \pm\infty} = T_{II}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь не учитывается скорость перемотки проволоки, что вполне допустимо для интервала времени $\tau = 0,5$ мс (скорость перемотки проволоки 15 – 30 мм/с).

Поставленная задача нелинейная. Точное решение данной системы целесообразнее получить методом конечных разностей при реализации конечно-разностной схемы решения [6–8].

В отличие от известных исследований [1, 2, 9, 10] решение системы уравнений (7) методом конечных разностей с использованием специально разработанных программ, позволяет при выполнении расчетов учитывать:

- зависимость теплофизических параметров материала ПЭИ и коэффициента теплоотдачи от температуры;
- изменение теплофизических параметров при использовании двухслойной конструкции ПЭИ;
- равную вероятность прохождения импульса в любой точке в границах гнезда.

Результаты

Получены графические зависимости, показывающие динамику изменения температуры каждой точки выделенного участка проволоки от действия единичного импульса, группы импульсов, которые проходят в одной точке, или с равной вероятностью в любой точке данного участка при различных условиях обработки.

Рассмотрим случай, наиболее характерный для электроэрозионной вырезной обработки и такой, что может привести к обрыву проволоки, когда разряды проходят с равной вероятностью в зоне, ограниченной размерами h, θ (рис. 1). Размеры локального участка выбраны, исходя из визуальных исследований зоны обрыва проволоки. Критической с точки зрения высокой вероятности обрыва для большинства латунных проволок является температура сечения $\sim 400^{\circ}\text{C}$, при которой предел прочности материала снижается почти в два раза. Практически не влияет на границу прочности температура ниже $\sim 200^{\circ}\text{C}$ [3]. Для упрощения графического материала рассмотрим динамику изменения температуры в точке A ($\theta = 0, r = 0,25 d_{пр} = 0,05$ мм, $z = 0$), температура которой наиболее близка к средней по сечению (см. рис. 1).

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, скорость роста и равновесное значение температуры для $E_{кт} \sim 0,18$ мДж определяются частотой прохождения разрядов и величиной коэффициента теплоотдачи. В реальном процессе резания за счет образования газовых пузырей в МЭП, может происходить быстрое изменение коэффициента теплоотдачи в зоне локализации разрядов, при этом действительная температура сечения в любой момент времени находится в зоне, ограниченной кривыми 1 и 3. Точка перегиба кривой соответствует прекращению подачи энергии на промежуток.

Следует отметить, что в области исследованных режимов нагревание локального участка ПЭИ до опасной температуры возможно лишь при условии ее пребывания достаточное время в газопаровой смеси.

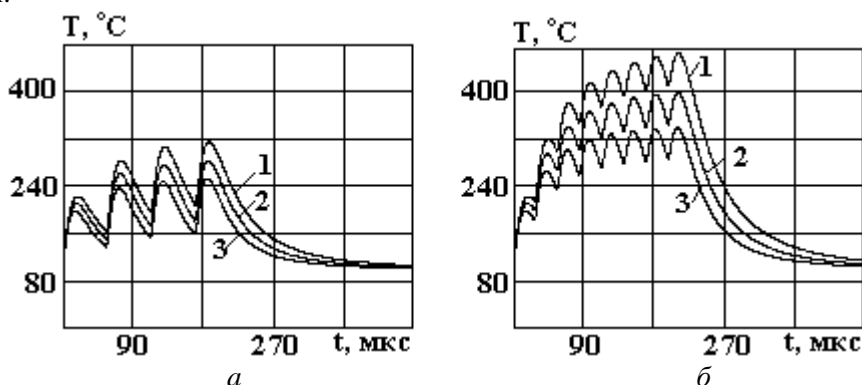


Рис. 2. Динамика изменения температуры в точке А:

Частота прохождения импульсов 22 (а) и 44 (б) кГц; 1 – $\alpha = 10^3 - 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; 2 – $\alpha = 10^4 - 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; 3 – $\alpha = 10^4 - 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $I_A = 80 \text{ А}$; $\tau = 1,0 \text{ мкс}$; $E_{\text{км}} = 0,18 \text{ мДж}$

Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая оценить динамику изменения температуры каждой точки локального участка ПЭИ от действия единичного импульса, группы импульсов, которые проходят в одной точке или с равной вероятностью в любой точке данного участка при разных условиях обработки.

2. Модель может служить основой для инженерных расчетов постоянных времени режимов работы генератора и условий обработки, которые гарантируют повышение производительности электроэрозионных вырезных станков при безобрывной обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левит М.Л., Парадизова. Аналитическая оценка постоянной составляющей температурного поля электрода-проволоки // Электронная обработка материалов. 1988. № 3. С.12 – 15.
2. Осипенко В.И. Повышение производительности и точности размерной электроэрозионной обработки на вырезных станках с ЧПУ: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1999.
3. Ступак Д.О. Оптимізація процесу енерговиділення в між електродному проміжку для умов електроерозійного дротяного різання: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 2002.
4. Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А. Автоматизированные электроэрозионные станки. Л., 1984.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.
6. Шуп Терри Е. Прикладные численные методы в физике и технике. М., 1990.
7. Беляев Н.М., Рядно А.А. Математические методы теплопроводности. Киев, 1993.
8. Волков Е.А. Численные методы. М., 1982.
9. Коренблюм В.М., Бихман Б.М., Алексеев Г.А. Методика расчета параметров режима высокопродуктивного вырезания на электроэрозионных станках с проволочным электродом // Электронная обработка материалов. 1988. № 6. С. 6–11.
10. Коренблюм М.В. О связи величины шероховатости поверхности с длительностью и амплитудой импульсов разрядного тока при электроэрозионной обработке // Физика и химия обработки материалов. 1972. № 4. С. 135 – 138.

Поступила 03.10.03

Summary

Motivation of building mathematical models for the evaluation of heat condition of local area wire electrode-instrument (WEI) and results of according studies direct on the determination of parameters of heat load on WEI depending on leading energy and condition of cooling wire are brought in the article. During performing calculation on developing mathematical models experimental dates given on sharing energy between the detail and wire and correlation of energy, consumed on the heating and removing an electrode material were used. Detailed analysis of received results has confirmed a possibility of use developed model as a basis to engineering calculation of constant time of states of working generator and condition of processing, which guarantees increasing of electrodischarge wire tool production and ensure processing without tear of electrode.