

УДК 621.9.048.4

Р. Х. ГАНЦЕВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Рассмотрены пути повышения производительности электроэрозионной перфорации отверстий. Получена модель образования эрозионных лунок электродами малого диаметра. На основе анализа результатов моделирования разработан способ оптимизации управления параметрами разрядных импульсов. *Электроэрозионная перфорация ; эрозионные лунки ; разрядный импульс*

Под электроэрозионной обработкой (ЭЭО) отверстий малого диаметра подразумевается процесс перфорации отверстий диаметром 0,4÷1,2 мм на глубину 5÷20 мм (как сквозных, так и глухих), одновременно несколькими (до 1000) электродами. Данный процесс широко распространен при изготовлении деталей газотурбинных двигателей. В настоящее время более 50% электроэрозионных станков на моторостроительных предприятиях занято на операциях перфорации.

Развитие современного двигателестроения требует ужесточения требований по точности, шероховатости и глубине измененного слоя деталей, что с учетом все более широкого применения титановых сплавов, вызывает затруднения при реализации операции ЭЭО малых отверстий с требуемой производительностью.

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Снижение производительности обусловлено:

- ухудшением условий эвакуации продуктов обработки вследствие уменьшения бокового зазора (вызвано требованиями повышения точности обработки);
- развитием явления «прижога» электрода-инструмента (Э-И) из-за высокой степени пространственной локализации разрядов в зоне обработки и ухудшением условий отвода тепла;
- снижением энергии разрядных импульсов для обеспечения требуемой шероховатости поверхности и глубины измененного слоя.

Известны способы улучшения эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны [1] за счет вибрации Э-И (амплитуда ~0,1 мм, частота 50 Гц), релаксации Э-И (амплитуда 1–2 мм, частота 0,5–1 Гц) или за счет прокачки рабочей жидкости через Э-И. Использование только этих способов не позволяет решить задачу повышения производительности перфорации глубоких отверстий одновременно несколькими электродами. Известные способы повышения производительности ЭЭО за счет подачи в зону обработки мощных импульсов позволяют избежать появления «прижогов» Э-И, но не всегда обеспечивают достижение требуемых технологических показателей обработки [2]. Решение актуальной задачи повышения производительности обработки возможно лишь при комплексном управлении параметрами разрядных импульсов и скоростью подачи Э-И.

В работе [3] установлено, что для данного обрабатываемого материала при заданной энергии импульса существует оптимальная длительность разрядного импульса, при которой величина эрозионного съема материала максимальна. Полученные результаты справедливы, когда размеры электродов существенно превышают соответствующие размеры канала разряда. При соизмеримых величинах размеров электродов и канала разряда необходимо учитывать влияние геометрии Э-И на величину эрозионного съема. Экспериментальные исследования данной взаимосвязи трудоемки, и их результаты сложно интерпретировать. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность построения аналитической модели, связывающей размеры пер-

фоорируемой эрозионной лунки с энергией и длительностью разрядных импульсов и диаметром Э-И.

**МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ЛУНОК ЭЛЕКТРОДОМ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

При построении модели исходим из следующих допущений:

1. Основным тепловым процессом, определяющим электроэрозионное разрушение (для тепловых потоков  $q \sim 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>), является теплопроводность. Влиянием плавления и испарения, с достаточной для инженерных расчетов точностью, пренебрегаем.

Определим для нашего случая  $q$  как:

$$q = \frac{\Delta U_A I}{\pi R_0^2}, \quad (1)$$

где  $q$  – тепловой поток,

$\Delta U_A$  – прианодное падение напряжения,

$I$  – разрядный ток,

$R_0$  – радиус электрода, который в дальнейшем будет отождествляться с радиусом распределения теплового потока.

Модель зависимости величины эрозии от диаметра Э-И строим в рамках известной математической задачи нагрева полупространства поверхностным источником тепла  $q$ , равномерно распределенным по площади радиусом  $R_0$ .

Правомерность этих допущений подтверждается следующими обстоятельствами:

- в продуктах эрозионного разрушения металлов импульсом с  $q \sim 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> значительную часть составляет вещество в конденсированной фазе;

- анализ соотношения энергии разрядных импульсов к массе выброшенного металла показывает, что эта величина меньше удельной теплоты испарения, но больше удельной теплоты плавления и значительная часть энергии расходуется на процесс теплопроводности в твердой фазе;

- в общем тепловом балансе количество тепла, расходуемого на плавление, не превышает 10% от количества тепла отводимого через электрод.

Уравнение, описывающее нагрев полупространства поверхностным источником тепла, равномерно распределенным по площади радиуса  $R_0$ , обеспечивающего плотность теплового потока  $q$  в цилиндрической системе координат  $(r, z)$ , можно записать как [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} T|_{r \rightarrow \infty} &= T_0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{z \rightarrow \infty} &= 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \begin{cases} q & r \leq R_0 \\ 0 & r > R_0 \end{cases}, \end{aligned}$$

и начальном условии

$$T|_{t=0} = T_0,$$

где  $a$  – температуропроводность,

$\lambda$  – теплопроводность.

Решение этой задачи известно и имеет вид:

$$\begin{aligned} T &= \frac{qR_0}{2\lambda} \int_0^\infty J_0(\lambda r) J_1(\lambda R_0) \times \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &e^{-\lambda z} \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} - \lambda\sqrt{at} \right) - \\ &- e^{-\lambda z} \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} + \lambda\sqrt{at} \right) \end{aligned} \right\} \frac{d\lambda}{\lambda}, \quad (3) \end{aligned}$$

здесь  $J_0(x), J_1(x)$  – цилиндрические функции Бесселя,

$\operatorname{erf}(x)$  – интеграл вероятности,

либо

$$\begin{aligned} T &= \frac{q}{2\pi\lambda a} \int_0^t dt' \int_0^{R_0} r' dr' \times \\ &\times \frac{\exp \left( \frac{z^2 + r^2 + r'^2}{4a(t-t')} \right)}{(t-t')^{3/2}} I_0 \left[ \frac{rr'}{ra(t-t')} \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

Примем геометрическую форму лунки, образующейся от воздействия разрядного импульса тождественной конфигурации изотермы плавления  $T = T_{пл}$ . Тогда из (3, 4) получим выражение, определяющее глубину лунки при условии  $T = T_{пл}, r = 0$ , а выражение для радиуса лунки – при условии  $T = T_{пл}, z = 0$ .

Перейдем к безразмерным переменным:

$$\rho = \frac{r}{2\sqrt{at}}, \quad (5)$$

$$\xi = \frac{z}{2\sqrt{at}}. \quad (6)$$

Тогда из (4) получим уравнение для определения глубины лунки:

$$\theta \rho_0^2 = \sqrt{\pi} (ierfc(\xi) - ierfc(\sqrt{\xi^2 + \rho_0^2})), \quad (7)$$

где  $\theta$  — безразмерная температура, определяемая как,

$$\theta = \frac{2T_{пл}\pi^{3/2}\lambda t_n^{3/2}\sqrt{a}}{W}. \quad (8)$$

Для определения радиуса лунки из (3) получим уравнение

$$\theta \rho_0 = \sqrt{\pi} \left\{ \int_0^\infty \frac{J_0(\rho x) J_1(\rho_0 x)}{x} erf\left(\frac{x}{2}\right) dx \right\}. \quad (9)$$

Выражение (7,9) удобны тем, что зависимости радиуса и глубины лунки от размера радиуса действия теплового источника определяются единственным безразмерным параметром  $\theta$ .

Для упрощения решения уравнений (7) и (9) численными методами произведем замену функции

$$erf(z) = 1 - erfc(z), \quad (10)$$

тогда

$$\theta \rho_0 = I(\rho/\rho_0) - \sqrt{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(x\rho) J_1(x\rho_0)}{x} ertc\left(\frac{x}{2}\right) dx, \quad (11)$$

где через  $I(\rho/\rho_0)$  обозначен интеграл

$$I(\rho/\rho_0) = \sqrt{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(x\rho) J_1(x\rho_0)}{x} dx, \quad (12)$$

который выражается через полные эллиптические интегралы  $E(x)$  и  $K(x)$  [5]

$$I(\rho/\rho_0) = \begin{cases} 2E(\rho/\rho_0) & \rho \leq \rho_0 \\ \frac{2\rho}{\rho_0} \left[ E\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) - \left(1 - \frac{\rho_0^2}{\rho^2}\right) K\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) \right] & \rho > \rho_0 \end{cases}. \quad (13)$$

Бесконечный предел интегрирования выражения (11) может быть заменен конечным значением, так как подинтегральная функция является быстрозатухающей и при больших

значениях аргумента справедливо асимптотическое разложение [5]

$$erfc(z) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}z} e^{-z^2}. \quad (14)$$

В численных расчетах в качестве верхнего предела интегрирования принималось значение  $R = 8$ , так как при этом значение подинтегральной функции равно  $\sim 10^{-11}$  — то есть практически обращается в нуль. Для вычисления интеграла (11) используется стандартный алгоритм вычисления интегралов, основанный на использовании 7-точечной квадратурной формулы Гаусса, позволяющий получить относительную точность вычислений  $\sim 10^{-8}$ .

Для вычисления полных эллиптических интегралов  $E(z)$  и  $K(z)$  была использована их полиномиальная аппроксимация, обеспечивающая точность вычислений  $\sim 10^{-8}$  [6]. При вычислении объема лунки ее форма аппроксимировалась сферическим сегментом [3].

Для удобства представления результатов численных расчетов введем новые переменные

$$\rho^* = \rho \cdot \sqrt{\theta}, \quad (15)$$

$$\rho_0^* = \rho_0 \cdot \sqrt{\theta}. \quad (16)$$

Отметим, что для интересующей нас области диаметров Э-И и длительностей импульсов с точностью до  $\sim 10^{-6}$  можно считать, что

$$\rho_0^* = 1. \quad (17)$$

Анализ результатов численного моделирования показал:

- зависимость объема лунки от радиуса действия теплового источника имеет экстремальный характер.

На рис. 1 приведена зависимость безразмерного объема лунки  $V^*$  от безразмерного радиуса  $\rho^*$ . При этом:

$$V^* = \frac{V}{(2\sqrt{at_n})^3} \cdot \theta; \quad (18)$$

- в экстремальной точке при значениях  $\theta \leq 0,04$ , (что справедливо для условий ЭЭО отверстий малого диаметра) выполняется равенство:

$$R_0 = 0,62 \cdot 0,37\sqrt{2} \pi^{-3/4} a^{1/4} T_{пл}^{-1/2} \lambda^{-1/2} t^{-1/4} W^{1/2}; \quad (19)$$

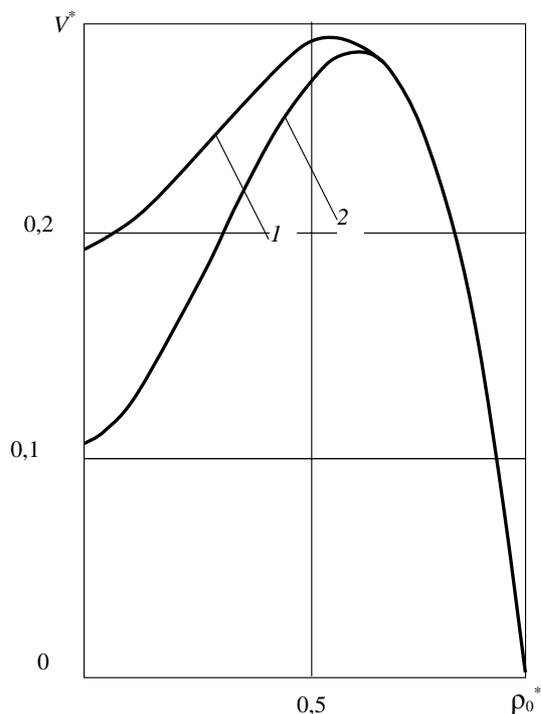
максимально достигаемый при этом объем лунки равен:

$$V = \frac{0,21}{\rho C T_{пл}} W, \quad (20)$$

а глубина

$$h = 0,94 \sqrt{at_{и}}; \quad (21)$$

• при малых значениях параметра  $\theta$  в широкой области режимов радиус лунки, с точностью до 10%, равен радиусу теплового источника.



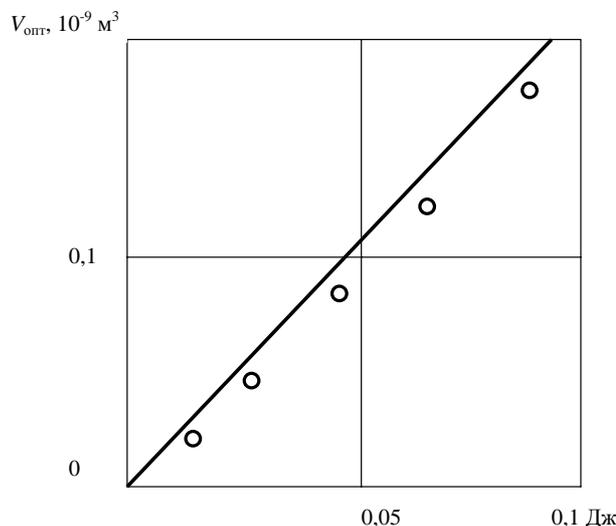
**Рис. 1.** Зависимость объема лунки от радиуса теплового источника при различных параметрах  $\theta$  (рассматриваются безразмерные параметры):  
1 —  $\theta = 0,04$ ; 2 —  $\theta = 0,0125$

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью экспериментальной проверки результатов моделирования была получена зависимость геометрических параметров эрозионных лунок от размеров Э-И.

Эксперименты проводились на серийном электроэрозионном станке 4Л721, оснащенном генератором ШГИ-63М. В качестве электродов использовались вольфрамовые стержни диаметром 0,6–2 мм и пластины из стали Х18Н10Т. Энергия импульса менялась в диапазоне 0,03–0,15 Дж, длительность составляла 100 мкс. Геометрические параметры лунок измерялись при помощи оптического микроскопа МИР-4.

Экспериментальные результаты подтвердили полученную аналитическим путем зависимость оптимального объема лунки  $V_{\text{опт}}$  от энергии импульса (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость оптимального объема лунки от энергии импульса при  $t_{и} = 250$  мкс; материал: анод — Х18Н10Т; катод — W.  
○ — эксперимент; — — расчет

#### ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЭО ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- при ЭЭО отверстий малого диаметра существуют оптимальные значения параметров разрядных импульсов (амплитуда тока, длительность импульсов и пауз между ними), зависящие не только от характеристик материалов электродов, но и от диаметра Э-И;
- оптимальные значения параметров разрядных импульсов меняются с изменением температуры электродов, перегрев которых (от действия предыдущих разрядных импульсов) может привести к существенному снижению производительности;
- в процессе управления необходимо контролировать температуру Э-И и соответственно изменять параметры разрядных импульсов.

Традиционно в процессе ЭЭО в зону обработки подаются регулярные (периодические) импульсы напряжения, переход которых в разрядные (пробой межэлектродного зазора) является хаотическим процессом. Вероятность пробоя межэлектродного зазора (МЭЗ) определяется множеством параметров, наиболее существенными из которых, являются величина МЭЗ и его электрическая

прочность. Последняя в свою очередь зависит от концентрации продуктов эрозии, вызванной предыдущим разрядом. В отличие от технологических схем ЭЭО габаритных деталей с интенсивной прокачкой рабочей жидкости, при ЭЭО малых отверстий вероятность пробоя зависит только от величины МЭЗ. Эффективное регулирование МЭЗ возможно за счет управления скоростью подачи Э-И. Величина задаваемой вероятности пробоя при этом выбирается эмпирическим путем (по результатам экспериментов) для каждой технологической операции с целью избежать «прижога» Э-И и, как правило, находится в пределах 0,58–0,62. Производительность обработки непосредственно определяется величиной вероятности пробоя МЭЗ. Поэтому необходимо реализовать управление параметрами разрядных импульсов, позволяющее повысить задаваемую величину вероятности пробоя МЭЗ.

Наиболее эффективный способ управления можно реализовать путем измерения и поддержания в заданных пределах температуры электродов в зоне обработки. При этом возможно вести обработку с максимальной производительностью и полностью исключить «прижоги» электродов, однако, измерение температуры Э-И в зоне обработки невозможно из-за отсутствия непосредственного доступа в зону обработки и износа Э-И в процессе обработки.

Оптимизация ЭЭО путем выбора и поддержания оптимальных параметров разрядных импульсов на основе априорной информации так же невозможна вследствие того, что:

- соотношение параметров разрядных импульсов, обеспечивающих оптимальную производительность, не всегда позволяет обеспечить требуемые значения шероховатости поверхности и износа Э-И. Как правило, требуемая величина паузы между импульсами существенно меньше ее оптимального значения, что приводит к перегреву Э-И при вероятности пробоя МЭЗ, близкой к 1;

- вероятностный характер разрядов требует учета возможности реализации нескольких непрерывно генерируемых (до сотен) разрядных импульсов и возникновения пауз между ними больше заданных.

Предлагается следующий способ управления параметрами разрядных импульсов:

- исходя из требуемых значений шероховатости определяем, по выражению (21), величину  $t_{и}^1$ ;

- в соответствии с размерами Э-И и  $t_{и}^1$  определяем, по выражению (19), оптимальное значение  $W$  и величину амплитуды тока в импульсе  $I_a^1$ , соответствующую значениям  $W$  и  $t_{и}^1$ ;

- на основании полученных значений  $W$  и  $t_{и}^1$ , в соответствии с технологическими рекомендациями [1], определяем величину  $t_{п}^1$ , минимизирующую износ Э-И;

- для вычисленного значения  $t_{п}^1$  по выражению (21) находим значения  $W^*$  и  $I_a^2$ .

В процессе обработки на электроды генерируются импульсы с параметрами  $I_a^1$ ,  $t_{и}^1$ ,  $t_{п}^1$ . По измерению напряжения на МЭЗ фиксируется факт реализации разрядного импульса. Для следующих импульсов меняется значение амплитуды тока на  $I_a^2$ , и если они при этом не реализуются как разрядные, то устанавливается исходное значение  $I_a^1$ .

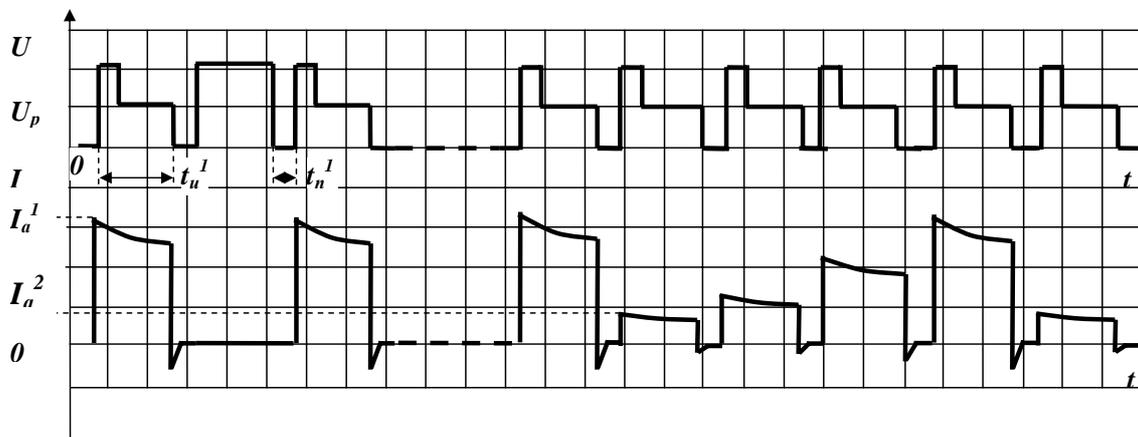


Рис. 3. Диаграмма тока и напряжения при реализации способа оптимального управления параметрами разрядных импульсов

В противном случае в каждом последующем разрядном импульсе увеличиваем  $I_a$  таким образом, чтобы достигалось значения  $I_a^1$ . Диаграмма тока и напряжения на электродах, иллюстрирующая данный способ управления параметрами разрядных импульсов, приведена на рис. 3.

Предлагаемый способ позволяет снизить вероятность перегрева электродов и добиться повышения производительности обработки на 15–20% за счет увеличения вероятности пробоя МЭЗ до 0,82–0,84.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты аналитического моделирования позволили объяснить механизмы снижения производительности ЭЭО малых отверстий, обусловленные несоответствием выделяемой энергии и длительности импульсов, диаметральной размерам Э-И, ведущие к уменьшению съема материала заготовки и перегреву электродов. Полученная модель позволяет определить оптимальные режимные параметры ЭЭО для заданных размеров Э-И.

На основе разработанного подхода в дальнейшем возможно изучение влияния формы разрядных импульсов тока на технологические параметры обработки (производительность обработки, точность формообразования, шероховатость поверхности и износ Э-И) и анализ тепловых процессов на электродах после завершения действия разряда.

Предложенный способ управления обеспечивает оптимизацию производительности обработки при выполнении требований по шероховатости и износу Э-И. Оптимизация

теплового режима электродов в процессе обработки позволяет минимизировать вероятность возникновения аварийных режимов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Саушкин, Б. П.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Б. П. Саушкин. М. : Дрофа, 2002. 655 с.
2. **Атрощенко, В. В.** Управление высокопроизводительным процессом ЭЭО титановых и жаропрочных сплавов / В. В. Атрощенко, Р. Х. Ганцев, Б. Т. Сафиуллин // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 10. С. 18–26.
3. **Золотых, Б. Н.** Физические основы ЭЭО / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. М. : Машиностроение, 1977. 358 с.
4. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. М. : Наука, 1964. 488 с.
5. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М. : Физматгиз, 1963. 1100 с.
6. **Абрамовиц, М.** Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. М. : Наука, 1979. 830 с.

### ОБ АВТОРЕ



**Ганцев Рустем Халимович**, д-рант каф. оборуд. и технол. свар. пр-ва. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1978). Канд. техн. наук по элем. автоматич. устр. (там же, 1987). Иссл. в обл. автоматиз. технол. процессов электрообработки.