

УДК 621.9.047

МНОГОКООРДИНАТНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТАМИ

А. Н. ЗАЙЦЕВ

Факультет авиационно-технологических систем УГАТУ
Тел: (3472) 22 86 66 E-mail: ipalex@ufanet.ru

Рассмотрена перспективная технологическая схема многокоординатной электрохимической обработки непрофилированным электрод-инструментом. Дана оценка основных технологических преимуществ и области эффективного использования данной схемы. Приведены постановка задачи и математическая модель процесса электрохимического формообразования. Рассмотрена блок-схема алгоритма работы системы автоматизированного расчета траектории движения непрофилированного электрод-инструмента. Приведены примеры поверхностей деталей и технологического оборудования

Многокоординатная электрохимическая обработка; непрофилированный электрод-инструмент

Электрохимическая обработка (ЭХО) — уникальный по своим технологическим возможностям метод обработки. Важнейшие преимущества его состоят в отсутствии физического износа инструмента, отсутствии на обработанной поверхности дефектных слоев, независимость выходных технологических показателей от прочности обрабатываемых материалов и др. Однако традиционная реализация ЭХО по классической схеме «прямого копирования» формы электрод-инструмента на поверхности детали не всегда эффективна. В частности, значительные технические и технологические трудности возникают при изготовлении деталей сложной формы, имеющих большую площадь (низкая точность и качество поверхности, большая металлоемкость оборудования, высокая стоимость изготовления электрод-инструмента и др.).

Появление в последнее десятилетие высокоточных многокоординатных станков с микропроцессорными системами числового программного управления (ЧПУ), существенно возросший уровень теоретических представлений о механизме процесса анодного растворения и развитие методов математического моделирования гидродинамики потока электролита, электрических и тепло-

вых полей в электролизерах создали реальную основу для постановки и практического решения задач объемного электрохимического формообразования непрофилированными электродами.

В качестве основных преимуществ процесса электрохимической обработки непрофилированными электрод-инструментами (ЭИ) по сравнению с классическими схемами «прямого копирования» можно назвать следующие [1]:

- снижение трудоемкости изготовления непрофилированного ЭИ;
- сокращение сроков технологической подготовки производства;
- интенсификация процесса съема материала за счет улучшения эвакуационных свойств межэлектродного промежутка (МЭП);
- повышение стабильности и прогнозируемости процесса съема материала во всех точках обрабатываемой поверхности;
- возможность локального программируемого изменения режима энергетического воздействия;
- независимость выходных технологических показателей по точности, удельной про-

изводительности и качеству поверхности от размеров обрабатываемой детали;

- возможность применения маломощных источников питания для обработки поверхностей деталей большой площади и др.

Область эффективного применения ЭХО непрофилированными ЭИ определяется, во-первых, изготовлением сложнофасонных поверхностей и криволинейных пазов на деталях из высокопрочных и твердых материалов в условиях единичного и мелкосерийного производства и, во-вторых, технологической интеграцией с другими электрическими методами. Последнее (в силу высокой избирательности метода) позволяет создать программируемое распределение и сочетание параметров качества обрабатываемой поверхности.

Сущность рассматриваемой в настоящей работе технологической схемы ЭХО непрофилированными электрод-инструментами состоит в следующем (рис. 1): стержневой ЭИ с полусферическим рабочим торцом r , вращаясь вокруг продольной оси, перемещается со скоростью V_k над поверхностью заготовки на некотором расстоянии s по заданной регулярной траектории (как правило, типа «зиг-заг»). ЭИ подключен к отрицательному, а заготовка — к положительному полюсам источника питания. В МЭП под давлением через сопла подается высокоскоростная напорная струя электролита с заданными физико-химическими параметрами. Для стабилизации потока электролита в МЭП, исключения разбрызгивания и возникновения электролитного тумана над заготовкой поддерживается определенный (30–50 мм) уровень рабочей жидкости, создающий стабилизирующий слой.

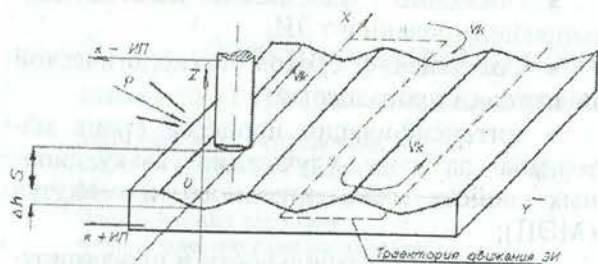


Рис. 1. Технологическая схема последовательно-строчной ЭХО непрофилированным ЭИ с полусферическим рабочим торцом

Управление контурной скоростью и параметрами (напряжением, током) источника питания осуществляется от системы ЧПУ. Это позволяет по программе изменять интен-

сивность процесса съема в каждой точке обрабатываемой поверхности.

Оценка типичных физико-технологических условий реализации процесса ЭХО в рамках предлагаемой схемы показывает, что влиянием газонаполнения и нагрева электролита в МЭП можно пренебречь. Таким образом, для описания процесса могут быть приняты условия «идеального» электрохимического формообразования [2], т. е.:

1. Закон Ома справедлив во всем пространстве между электродами.

2. Распределение электрического поля описывается уравнением Лапласа. Однако существует и отклонение от «идеальности», связанное с учетом нелинейного характера зависимости выхода по току от плотности тока $\eta(j)$. Так, значения МЭЗ, а соответственно и распределение плотности тока по сложнофасонной поверхности анода-заготовки могут различаться в 10–100 раз. В этой связи для обеспечения заданной точности и качества обработки необходимо использовать электролиты с высокой локализирующей способностью, (например, нитратные и перхлоратные). Их отличительной особенностью является резкое увеличение анодного выхода по току $\eta(j)$ с увеличением плотности тока j , что, очевидно, должно сказаться на форме образуемого следа на заготовке-аноде. Таким образом, при моделировании процесса формообразования необходимо учитывать нелинейный характер зависимости $\eta = \eta(j)$.

В качестве первого приближения формальная постановка задачи математического моделирования процесса ЭХО непрофилированными ЭИ с полусферическими рабочими торцами может быть определена следующим образом: найти напряженность электрического поля от точечного источника (катода) с интенсивностью N , расположенного на расстоянии a от плоского анода. Допустимость такой постановки обусловлена следующими соображениями. Во-первых, отличие эпюры распределения напряженности электрического поля при замене сферической поверхности катода точечным источником весьма мало. Во-вторых, величина припуска Δh мала по сравнению с расстоянием a до источника и радиус кривизны обрабатываемой поверхности много больше радиуса r_t кривизны (радиуса полусферы) рабочей части ЭИ. В совокупности это дает основание предположить, что величина напряженности поля на обработанной, искривленной поверхности анода будет мало отличаться от напряженности на

плоском аноде, расположенном на расстоянии $s^* = s + \Delta h/2$ от нижней кромки ЭИ.

Поле в рассматриваемом МЭП эквивалентно полю, создаваемому двумя источниками противоположной интенсивности, расположенными симметрично относительно плоскости анода. Как известно, в цилиндрической системе координат потенциал φ такого поля может быть записан в виде

$$\varphi(r, y) = \frac{N}{2\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + (y+a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (y-a)^2}} \right], \quad (1)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; $N = 2\pi U \frac{a^2 - S^2}{S}$; $a = (1,5r_t S + S(2,25r_t^2 + S^2 + r_t S)^{1/2})^{1/2}$; r_t — радиус сферы ЭИ [2].

Осевая составляющая напряженности электрического поля на поверхности детали (при $y = 0$) записывается в виде

$$E = \frac{d\varphi}{dz} = \frac{aN}{2\pi(r^2 + a^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

В соответствии с законом Фарадея сдвиг dz по нормали к обрабатываемой поверхности (величина снимаемого припуска с обратным знаком) точки поверхности с координатами (x, y) при движении источника вдоль оси x со скоростью V_t (рис. 1) может быть определен по формуле

$$dz(x, y) = -K_{ecm} \eta(j) E(x - x_0, y) dt = -\frac{K_{ecm}}{V_t} \eta(j) E(x - x_0, y) dx_0, \quad (3)$$

где $E(x - x_0, y)$ — напряженность поля в точке с координатами (x, y) , создаваемого электрод-инструментом, характеризующимся координатами (x_0, h) ; $K_{ecm} = \varepsilon \kappa_{el} / \rho$ — электрохимическая постоянная; ε — электрохимический эквивалент; ρ — плотность материала детали; κ_{el} — электропроводность электролита; η — выход по току; $j = \kappa_{el} E(x - x_0, y)$ — плотность тока.

Для расчета выхода по току может быть использована эмпирическая зависимость

$$\eta(j) = \begin{cases} \eta_0 \frac{j-j_1}{j-j_2}, & j > j_1, \\ 0, & j \leq j_1, \end{cases} \quad (4)$$

где j_1, j_2, η_0 — эмпирические коэффициенты.

Решение задачи (5) получается в виде квадратуры

$$z(y) = -\frac{K_{ecm} N}{\pi V_t} \times \int_{-\infty}^{+\infty} E(x - x_0, y) \eta(j) dx_0 = \frac{f(y)}{V_t}. \quad (5)$$

Пользуясь выражением (7) и допущением о малости снимаемого припуска, можно рассчитать форму поверхности детали, возникающую при n -строчной обработке, при условии, что сдвиг траектории на каждом шаге производится по оси y на величину Δy . Для этой цели может быть использована формула

$$z(y) = -\sum_{k=1}^n \frac{1}{V_t} f(y - (k-1)\Delta y), \quad (6)$$

где $f(y)$ — функция, полученная путем численного интегрирования (7).

Таким образом, выражения (2–6) образуют математическую модель ЭХО непрофилированным стержневым ЭИ со сферическим или полусферическим рабочим торцем, позволяющую рассчитать макро- и микропрофили образующейся поверхности детали.

Сравнение полученных на основе модельных расчетов результатов измерения профилей поперечных сечений поверхностей деталей после ЭХО в плоскости $O-Y$ показывает их удовлетворительное согласие [3].

Полученные зависимости послужили основой для разработки алгоритма и программного обеспечения параметрического синтеза управляющей технологической программы для последовательно строчной ЭХО непрофилированными ЭИ на трехкоординатном станке с ЧПУ (рис. 2).

Сущность алгоритма рассмотрим на примере технологической операции последовательно-строчной ЭХО стержневым ЭИ с полусферическим торцем, перемещающимся по траектории типа «зигзаг» над слабо искривленной поверхностью заготовки. Исходными данными для расчета являются:

- параметры, характеризующие свойства материала, из которого изготовлена деталь: плотность материала ρ , электрохимический эквивалент ε , электродные потенциалы φ_a, φ_k , а также коэффициенты j_1, j_2 для расчетной зависимости выхода по току от плотности тока $\eta(j)$, (6);

- электропроводность электролита κ_{el} ;

- геометрия детали;
- технологические показатели (максимально допустимая высота H_m микровыступов (гребешков между строками), величина припуска Δh);
- рабочее напряжение U и величина межэлектродного зазора s .

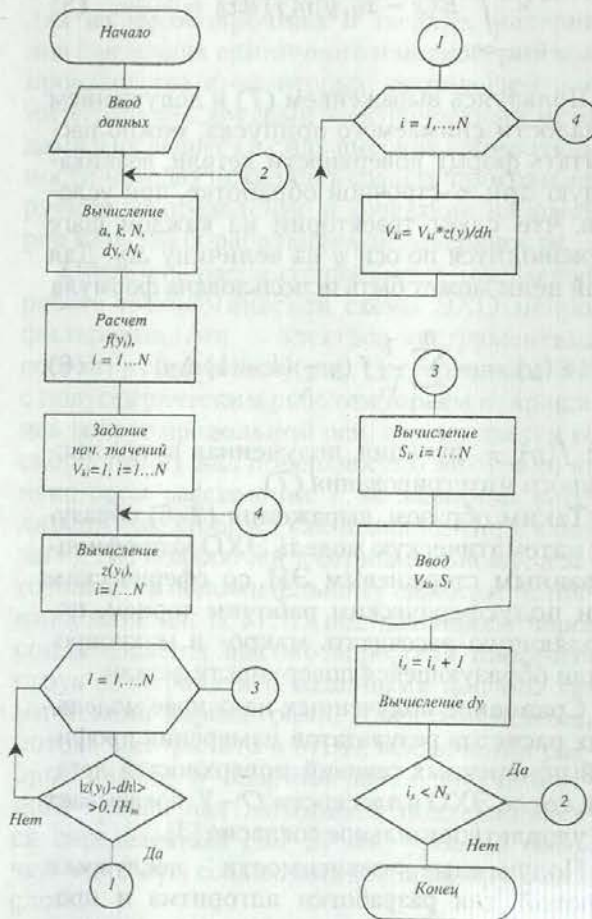


Рис. 2. Блок-схема расчета траектории ЭИ

Множество выходных данных включает кинематико-геометрические параметры формирующей траектории движения ЭИ.

В основу вычислительной процедуры (рис. 2) положена полученная математическая модель процесса электрохимического формообразования. Так, для поверхности детали, получаемой при нескольких проходах, можно использовать уравнение (6).

Величина шага Δy расположения строк в (6) находится при заданной величине снимаемого припуска Δh и максимальной высоте микровыступов H_m на обрабатываемой поверхности из уравнения (6). Так, в частности, для детали типа «трапеция» шаг Δy расположения строк, определяемый по наиболее широкой части b , и число проходов n могут быть

определены по формулам

$$\Delta y = \pi a \ln^{-1} \left(\sqrt{\frac{\Delta h}{H_m}} + \sqrt{\frac{\Delta h}{H_m} - 1} \right), \quad (7)$$

$$n = \left[\frac{b}{\Delta y} \right] + 1, \quad (8)$$

где $[\cdot]$ — обозначение целой части числа.

Для того чтобы на ширине b укладывалось целое число шагов Δy , после определения n уточняется значение Δy по формуле $\Delta y = b/n$.

Для получения функции (6) целесообразно заранее рассчитать $f(y)$ во всех узловых точках и для всех сечений детали. Подбор необходимых значений скоростей ЭИ сводится к решению системы уравнений:

$$-z_0(y_m) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{V_{tk}} f[(m-k)\Delta y] = \Delta h_m, \quad m = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $y_m = (m-1)\Delta y$ — значения y в узловых точках; Δh_m — заданные значения снимаемого припуска в точках сечения. Отметим, что если $\Delta h_m = \Delta h = \text{const}$, то для детали прямоугольной формы скорости V_{tk} постоянны по всей длине прохода и система (9) решается один раз. В остальных случаях система (9) рассчитывается в необходимом числе сечений детали.

Решение системы (9) производится итерационным способом. Пусть V_{tk}^0 — начальное приближение. Тогда

$$V_{tk}^{q+1} = \frac{z_0(y_m)}{\Delta h_m} V_{tk}^q. \quad (10)$$

Итерационная формула (10) повторяется до тех пор, пока невязки $|\Delta h_m + z_0(y_m)|$ не станут малыми.

После подбора скоростей во всех сечениях остается найти значение расстояния ЭИ от исходной поверхности, т. е. следует учесть, что процесс обработки в действительности идет над частично обработанной поверхностью, и выдержать заданный зазор S между ней и ЭИ. Для этого необходимо рассчитать величину слоя, снятого к моменту подхода ЭИ к данной точке:

$$\Delta z_{m,n} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{V_{tk}} f[(m-k)\Delta y] + 0,5 \frac{f(0)}{V_{tm}}, \quad (11)$$

где m — номер сечения; n — номер прохода. Тогда скорректированная величина зазора между ЭИ и исходной поверхностью детали равна

$$s_{m,n}^* = s - \Delta z_{m,n}. \quad (12)$$

При обработке детали типа «трапеция» для рассматриваемой структуры траектории (типа «зигзаг») расчет параметров траектории производится сначала для сечения, соответствующего большему основанию. Затем производится расчет параметров для всех остальных сечений. При этом величина Δy_m определяется по формуле

$$\Delta y_m = \frac{b_m}{N_s}, \quad b_m = b + (b - a) \frac{m - 1}{N_s - 1}, \quad (13)$$

где b — ширина детали в m -м сечении; N_s — число сечений.

В случае более общих форм заготовки и структуры траектории L введем в рассмотрение функции $x(l)$, $y(l)$, определяющие координаты проекции точек траектории на поверхности детали. Тогда форма профиля определяется формулой

$$\Delta h(l_m) = -\frac{K_{есм}}{2\pi} \int_0^{l_0} \frac{N(l) a(l) \eta(l) dl}{V_t(l) [r^2(l, l_m) + a^2]^{3/2}}, \quad (14)$$

где $r^2(l, l_m) = (x(l) - x(l_m))^2 + (y(l) - y(l_m))^2 + (z(l) - z(l_m))^2$; $\Delta h(l_m)$ — величина снятого припуска, отсчитываемая по нормали к поверхности заготовки. При вычислении координат траектории $l_0 = l_m$ при расчете окончательных значений съема $l_0 = L$.

Траектория движения ЭИ рассчитывается путем сдвига координат точек вдоль единичного вектора нормали \vec{n} к поверхности детали от точек проекции траектории

$$(x'_m, y'_m, z'_m) = (x_m, y_m, z_m) + \vec{n}(x_m, y_m, z_m) \Delta h(l_m).$$

Высоту микровыступов H_m в этом случае можно получить из (14), сравнивая Δh в точках поверхности детали, находящихся на линиях проекции траектории, и между ними.

Рассмотренные выше математическая модель процесса и алгоритм расчета параметров

управляющей программы для станков с ЧПУ были положены в основу создания промышленной системы автоматизированной подготовки управляющих программ. Такая система была создана совместно с научными сотрудниками ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского на базе САП Gemma 3/5d [4].

Модуль программирования электрохимической обработки поверхностей оформлен в виде дополнения к базовой промышленной системе Gemma 3/5D, предназначенной для автоматизации программирования фрезерных и электроэрозионных станков с ЧПУ. Несмотря на это, он может использоваться и автономно, при наличии подготовленных файлов данных со стандартным представлением опорной траектории 5-координатной фрезерной обработки детали, а также наличии заготовки с известным, приблизительно постоянным припуском к обрабатываемой поверхности.

Описанная система была использована для освоения технологии финишной обработки аэромоделей и рабочих поверхностей штампов и пресс-форм (рис. 3, 4) на специальном 3-координатном электрохимическом станке (рис. 5), изготовленном на Стерлитамакском станкостроительном заводе.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что технологическая схема многокоординатной электрохимической обработки непрофилированным электрод-инструментом имеет ряд существенных преимуществ перед классическими схемами «прямого копирования». Преимущественная область использования данной схемы: изготовление сложнопрофильных поверхностей деталей из высокопрочных сталей и сплавов.

2. Приведена постановка задачи и математическая модель процесса электрохимического формообразования для последовательно-строчной обработки непрофилированным электрод-инструментом с полусферическим рабочим торцом.

3. На основе математической модели разработана блок-схема алгоритма работы системы автоматизированного расчета рабочей траектории движения непрофилированного электрод-инструмента.

4. Результаты работы имеют комплексное освоение и апробирование. Приведены примеры поверхностей деталей и технологического оборудования для многокоординатной электрохимической обработки непрофилированными электрод-инструментами.

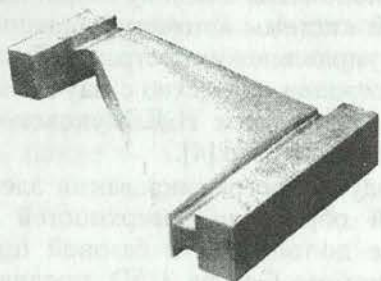


Рис. 3. Крыльевой элемент аэромодели, изготовленный методом последовательно-строчной ЭХО непрофилированными ЭИ

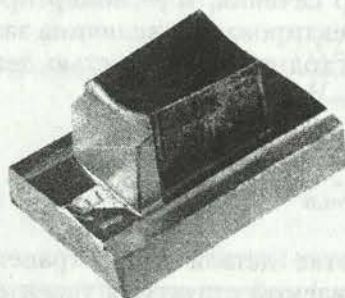


Рис. 4. Пуансон штампа для изотермической штамповки с рабочей поверхностью, изготовленной методом последовательно-строчной ЭХО непрофилированными ЭИ

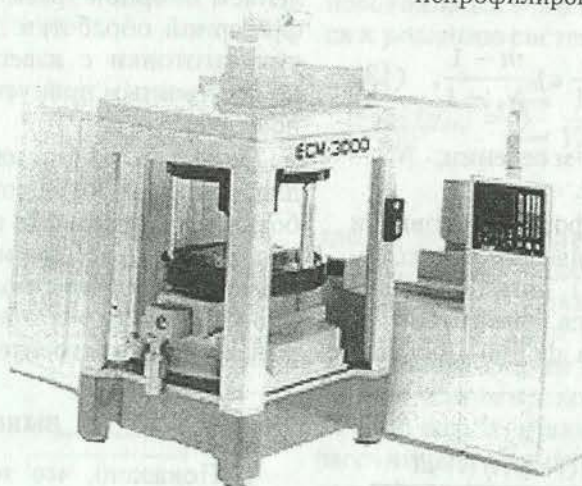


Рис. 5. Электрохимический трехкоординатный станок с ЧПУ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А. Н., Безруков С. В., Гимаев Н. З. Технология и оборудование для прецизионной электрохимической размерной обработки. М.: ВНИИТЭМР, 1990. 64 с.
2. Житников В. П., Зайцев А. Н. Математическое моделирование электрохимической размерной обработки. Уфа: УГАТУ, 1996. 221 с.
3. Зайцев А. Н., Житников В. П., Файфер Н. Л. К вопросу о расчете параметров электрохимического формообразования сложнофасонных деталей непрофилированными электрод-инструментами // Электронная обработка материалов. 1989. № 5. С. 3–6.
4. Вермель В. Д., Житников В. П., Зайцев А. Н. и др. Автоматизация подготовки программ электрохимической обработки поверхностей электродом с полусферической рабочей частью на трехкоординатном станке с ЧПУ // Электронная обработка материалов. 1994. № 3. С. 9–15.

ОБ АВТОРЕ

Зайцев Александр Николаевич, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства, науч. руковод. лаборатории электрических методов обработки УГАТУ. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1972), д-р техн. наук по процессам физико-технической обработки и САПР (Воронежский техн. ун-т, 1991). Исследования в области электрофизической и электрохимической размерной обработки материалов.

