

УДК 621.9.04

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-СТРОЧНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЕРЖНЕВЫМ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОМ

Зайцев А.Н., Житников В.П.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа,  
e-mail: alexandr\_zaytsev@mail.ru

В последние десятилетия возрос интерес к использованию электрофизических и электрохимических методов обработки с использованием современных технологических схем многокоординатной генерации сложных поверхностей инструментами простой геометрической формы. Примерами могут служить технологические схемы электрохимической обработки, осуществляемой посредством многокоординатного движения непрофилированного (стержневого, проволочного) электрода-инструмента. Повышение эффективности практического применения данных технологий требует решения ряда оптимизационных задач, связанных с выбором параметров режима и условий обработки. Рассмотрена одна из перспективных технологических схем многопроходной последовательно-строчной электрохимической обработки сложнофасонных поверхностей деталей с использованием непрофилированного стержневого электрода-инструмента с полусферическим рабочим торцом, позволяющая в автоматическом режиме обеспечить изготовление деталей с финишными показателями точности и качества поверхности и без применения ручного труда. Применительно к данной схеме разработана математическая модель процесса и рассмотрена задача оптимального выбора параметров режима, при которых для заданного количества проходов достигается минимальное суммарное время обработки детали с заданной точностью, шероховатостью и глубиной измененного поверхностного слоя. Полученные модели могут быть рекомендованы для практических технологических расчетов выбора режимов обработки при проектировании технологии.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, стержневой электрод-инструмент, оптимизация

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF SEQUENTIAL STRING ELECTROCHEMICAL MACHINING WITH ROD-TYPE TOOL ELECTRODES

Zaytsev A.N., Zhitnikov V.P.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education  
«Ufa State Aviation Technical University», Ufa, e-mail: alexandr\_zaytsev@mail.ru

In recent decades, there has been increased interest in electrophysical and electrochemical machining methods using advanced technological schemes for multi-coordinate generation of complex surfaces by tools of simple geometric shape. These include technological schemes of electrochemical machining performed by multi-coordinate movement of a plane (rod- or wire-type) tool electrode. To improve the efficiency of their practical application, these technologies require solving a number of optimization tasks associated with the choice of mode parameters and processing conditions. We considered one of the most promising technological schemes of multi-pass sequential string electrochemical machining of complex-shaped surfaces of parts using a plane rod-type tool electrode with a hemispherical working end, which allows to automatically ensure the production of parts with finishing indicators of accuracy and surface quality without manual intervention. For this scheme we developed a mathematical model of the process and analyzed a task of optimal choice of the mode parameters, under which the minimum total machining time with given accuracy, roughness and depth of the changed surface layer for the given number of passes is achieved. These models can be recommended for practical technological calculations of the choice of machining modes when designing the technology.

**Keywords:** electrochemical machining, rod-type tool electrode, optimization

В последние десятилетия возрос интерес к использованию электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭМО) с применением современных технологических схем генерации поверхности. Примерами могут служить технологические схемы электрохимической обработки, осуществляемые посредством многокоординатного движения непрофилированного (стержневого, проволочного) электрода-инструмента (ЭИ) [1–3]. Повышение эффективности практического применения данных технологий требует решения ряда оптимизационных задач, связанных с выбором параметров режима и условий обра-

ботки. Актуальной в связи с этим является задача поиска оптимальных, с точки зрения времени обработки, режимов многопроходной последовательно-строчной электрохимической обработки.

Цель исследования: разработка математической оптимизационной модели процесса последовательно-строчной многопроходной электрохимической обработки стержневым ЭИ с полусферическим рабочим торцом; использование этой модели для решения задачи оптимизации параметров режима многопроходной обработки в целях достижения минимального времени на выполнение операции.

*Описание технологии  
и математическая модель*

Обработка, снятие припуска осуществляются по технологической схеме последовательно-строчной электрохимической обработки (ЭХО) непрофилированным электродом-инструментом с полусферическим рабочим торцом [4].

Сущность технологической схемы состоит в следующем: стержневой ЭИ с полусферическим рабочим торцом радиуса  $r_i$  и изолированной державкой, соединенный с отрицательным полюсом источника питания, двигаясь со скоростью  $V_k$  по зиг-

загообразной последовательно-строчной траектории с шагом строк  $\Delta y$  и с зазором  $s$  над обрабатываемой поверхностью заготовки, соединенной с положительным полюсом источника питания, снимает слой металла – припуск  $z$  (рис. 1а). В межэлектродный промежуток (МЭП) подается электролит под давлением  $P$ .

Для расчета поперечного профиля единичного следа  $z(y)$ , который образовался при движении НЭИ вдоль прямой  $y = 0$ ,  $z = a$  из минус бесконечности до точки  $(0, 0, a)$  может быть использована формула [4], рис. 1б:

$$z(y) = -\frac{K_{есм} \eta_a a N}{2\pi V_k} \int_{-\infty}^0 \frac{dx_0}{[(x-x_0)^2 + y^2 + a^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где

$$N = 2\pi(U + \varphi_c - \varphi_a) \frac{a^2 - s^2}{s}, \quad (1a)$$

$$K_{есм} = \frac{M_a}{\rho_a n_a F} v, \quad (1б)$$

$$a = \sqrt{1,5r_i s + s\sqrt{2,25r_i^2 + s^2 + r_i^2}}, \quad (1в)$$

$M_a$  – атомная масса металла анода, кг/моль;  $n_a$  – валентность металла анода;  $F$  – число Фарадея 96500, Кл/моль;  $v$  – электропроводность электролита, См/м;  $\rho_a$  – плотность растворяемого материала анода, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_a$  – выход по току;  $a$  – расстояние до эквивалентного источника, м;  $N$  – интенсивность источника, Вм, рис. 1б;  $\varphi_c$ ,  $\varphi_a$  – электродные потенциалы катода и анода соответственно, В.

Ранее, в работе [5], нами была проведена оценка погрешности разработанной модели, показавшая, что модель позволяет с удовлетворительной точностью описывать процессы в наиболее интересной для практической области значений технологических параметров.

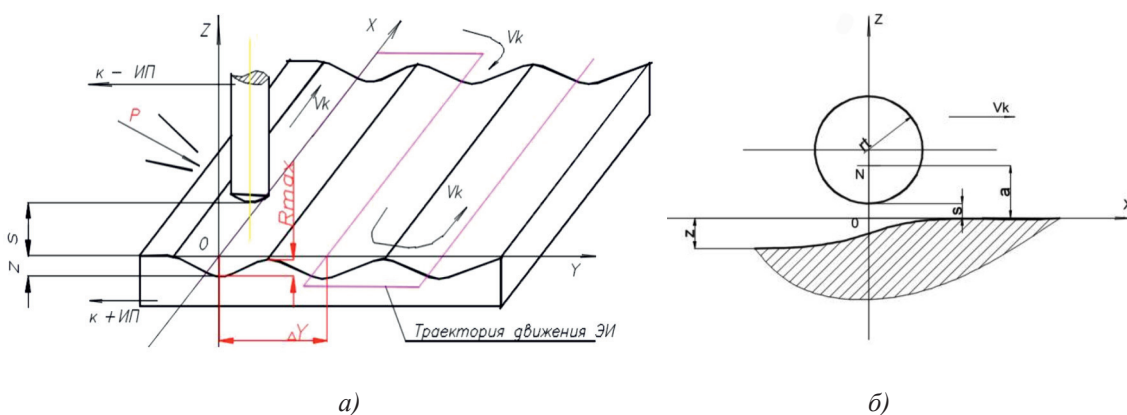


Рис. 1. Схемы обработки: а – технологическая схема последовательно-строчной электрохимической обработки поверхности электродом-инструментом с полусферическим торцом; б – расчетная схема

Электродные потенциалы и анодный выход по току в общем случае являются функциями плотности тока. В настоящей работе мы принимаем  $\eta_a(j) = \text{const}$  (что допустимо при использовании хлоридного электролита), электродные потенциалы катода и анода также приняты постоянными и равными  $\varphi_c = 1,5 \text{ В}$ ,  $\varphi_a = 0,5 \text{ В}$  [6].

Из (1) при  $x$ , стремящемся к бесконечности (рис. 1б), получим форму сечения единичного следа после полного цикла обработки:

$$z(y) = -\frac{K_{ecm} \eta_a a N}{\pi V_k} \frac{1}{y^2 + a^2}. \quad (2)$$

Скорость подачи электрода-инструмента  $V_k$  может быть определена из (2), если принять  $y = 0$ :

$$V_k = \frac{K_{ecm} \eta_a N}{\pi z(0) a q}, \quad (3)$$

где  $q = 1/ft_w$  – скважность импульсов тока (отношение периода следования импульсов к длительности импульса);  $t_w$  – длительность импульса тока;  $f$  – частота следования импульсов тока.

Форму поверхности детали, возникающую в соответствии со схемой (рис. 1а) при  $m$ -строчной обработке и при условии, что сдвиг траектории на каждом шаге производится по оси  $y$  на величину  $\Delta y$ , можно рассчитать по формуле:

$$Z(y) = -\sum_{k=1}^m \frac{1}{V_k} f(x - x_0, y - (k-1)y), \quad (4)$$

где

$$f(y) = -\frac{K_{ecm}}{\pi a} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x - x_0, y) \eta_a(j) dx_0, \quad (4a)$$

где напряженность электрического поля в МЭП:

$$E(x, y) = \frac{a N}{2\pi \left[ (x - x_0)^2 + y^2 + a^2 \right]^{3/2}}. \quad (4б)$$

При суммировании от  $k = -\infty$  до  $k = +\infty$  выражение (4) может быть преобразовано в вид:

$$z(y) = -\frac{K_{ecm} \eta_a N}{\pi V_k a} \frac{\text{sh}\left(\frac{2\pi a}{y}\right)}{\text{ch}\left(\frac{2\pi a}{y}\right) + \cos\left(\frac{y}{y}\right)}, \quad (5)$$

Из (5) может быть получена формула для расчета высоты гребешка  $R_{\max}$  (рис. 1а),

образующегося при наложении двух соседних строк в зависимости от шага строк  $\Delta y$ :

$$R_{\max} = \frac{2K_{ecm} \eta_a N}{\pi V_k y} \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{2\pi a}{y}\right)}. \quad (6)$$

Приняв в (6)  $R_{\max}$  равным требуемой величине шероховатости  $R_z$ , можно определить необходимый шаг  $\Delta y$  расположения строк. При этом количество строк  $m$  зависит от ширины заготовки  $B$  и равно:

$$m = \frac{B}{\Delta y}, \quad (7)$$

где  $m$  – количество строк;  $B$  – ширина детали, м;  $\Delta y$  – шаг строк, м.

На основе уравнений баланса энергии при прохождении тока электролиза через межэлектродный промежуток в течение времени  $t_w$  действия импульса тока, с учетом процессов Джоулева тепловыделения и катодного газовыделения, получим систему уравнений для расчета температуры  $T_t$  и относительного объемного газонаполнения  $c_g$  электролита [4]:

$$\begin{cases} \frac{dT_t}{dt_w} = \frac{U^2 v}{c\rho(1-c_g)s^2} \\ \frac{dc_g}{dt_w} = \epsilon_H \frac{U}{s^2} \frac{R_g(T_0 + T_t)v}{PcM_H} \end{cases} \quad (8)$$

$$v = v_0 (1 + \alpha_T T_t) (1 - c_g)^{3/2}, \quad (9)$$

где  $v$ ,  $v_0$  – текущая и начальная электропроводность электролита, См/м;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент проводимости электролита, 1/К;  $P$  – давление электролита в МЭП, Па;  $M_H$  – молярная масса водорода, кг/моль;  $\epsilon_H$  – электрохимический эквивалент водорода, кг/Кл;  $\rho$  – плотность электролита, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость электролита, Дж/кгК;  $c_g$  – относительное объемное газонаполнение;  $T_0$ ,  $T_t$  – начальная и текущая температура электролита, К;  $t_w$  – длительность прохождения тока, с;  $R_g$  – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль·К);  $s$  – межэлектродный зазор, м.

Из приведенной системы уравнений (7–9) может быть определена длительность импульса  $t_w$ , при которой ток через МЭП не прерывается в связи с заполнением электролита в нем газом или вскипанием. Приняв для заданных  $U$  и  $s$  в качестве максимально допустимого  $c_g = 0,63$ , время протекания тока  $t_w$  определим из решения системы уравнений при начальных условиях  $t_w = 0$ ;  $c_g = 0$ ;  $T_t = 0$ .

Из решения системы (7–9) следует, что проводимость  $\nu$  электролита (как проводника второго рода) в начале импульса возрастает выше начальной в связи с влиянием температуры при нагреве Джоулевым теплом (рис. 2а) на проводимость электролита, а затем уменьшается в связи с возрастанием газонаполнения межэлектродного промежутка (рис. 2б) за счет выделяющегося при электролизе водорода (рис. 2в). В момент  $t_w$  достижения предельного газонаполнения МЭП проводимость электролита резко снижается, и ток прерывается.

Анализ решений системы уравнений (7–9) при изменении напряжения и зазора показывает, что увеличение напряжения  $U$  и уменьшение величины межэлектродного зазора  $s$  приводят к увеличению плотности тока в импульсе  $j_a$  (рис. 3а), но при этом и уменьшают его длительность  $t_w$  (рис. 3б). В связи с этим средняя плотность тока  $j_m$  за период следования импульсов (определяющая, в соответствии с законом Фарадея, производительность процесса) уменьшается с увеличением напряжения (рис. 3в).

При электрохимической обработке шероховатость  $Rz$  и глубина измененного слоя  $H$  (с растрогом по границам зерен) на обработанной поверхности, как правило, уменьшаются с увеличением плотности тока  $j_a$  и могут быть, например, для сплавов на никелевой основе для  $j_a$  плотность тока,  $A/cm^2$  в диапазоне  $5 \leq j_a \leq 80$  описаны следующими эмпирическими функциями для:

$$Rz(j_a) = 5,745351 - 0,17618j_a + 0,00144j_a^2, \quad (10)$$

$$H(j_a) = 20,7077 - 0,39811j_a + 0,00197j_a^2, \quad (11)$$

где  $j_a$  – плотность тока,  $A/cm^2$ ;  $Rz$  – средняя высота микровыступов,  $\mu m$ ;  $H$  – глубина

измененного слоя,  $\mu m$  при  $j_a > 80$ ,  $Rz = 0,7$ ,  $H = 0$ .

Плотность тока  $j_a$  в формулах (10), (11) может быть определена по формуле для точки поверхности, расположенной на оси ЭИ ( $x = 0, y = 0$ , рис. 1а):

$$j_a = \nu_0 \cdot \frac{N}{2\pi a^2},$$

где  $j_a$  – амплитудная плотность тока,  $A/m^2$ ;  $\nu_0$  – начальная электропроводность электролита,  $См/м$ ;  $N$  – интенсивность источника,  $Вм$ ,  $a$  – расстояние до эквивалентного источника,  $м$ .

Однако, как было показано выше, снять весь припуск при высокой плотности тока и получить финишные значения шероховатости малопроизводительно, так как это сопряжено со снижением эффективной длительности импульса и, соответственно, снижением средней плотности тока (рис. 3а, 3б, 3в). В связи с этим целесообразно разделить припуск на части (рис. 4) и удалять его за соответствующее число проходов, удаляя каждый слой металла в каждом проходе на оптимальных по суммарному времени обработки  $t_{sum}$  режимах.

При нескольких проходах  $i = 1, \dots, n$  общее время обработки  $t_{sum}$  обработки складывается из суммы времен  $t_i$  удаления каждой части припуска:

$$t_{sum} = t_1 + t_2 + \dots + t_n, \quad (12)$$

где

$$t_i = \frac{L}{V_{k_i}}, \quad (13)$$

где  $L$  – длина детали.

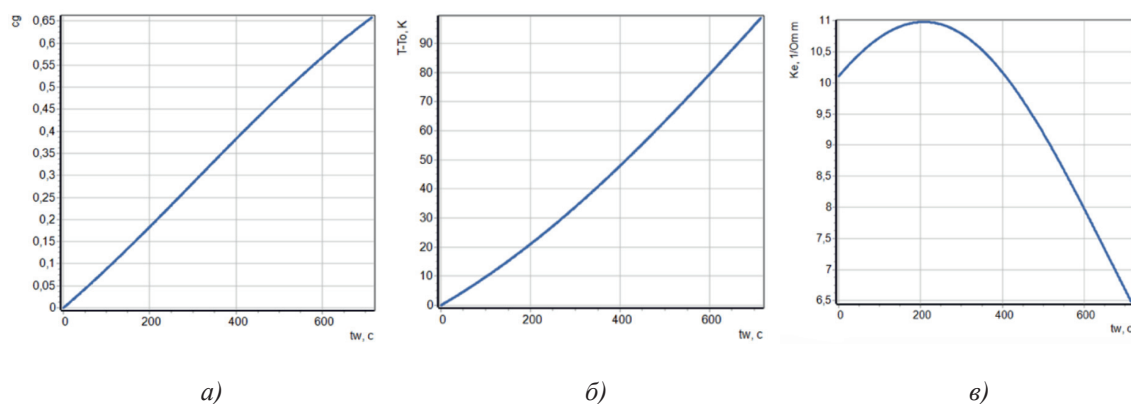
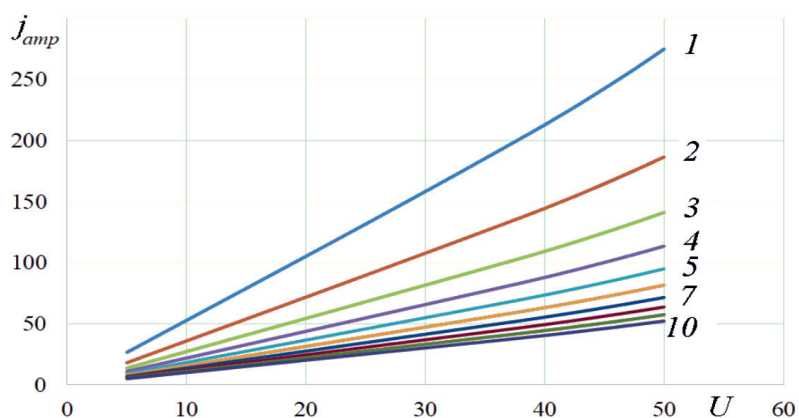
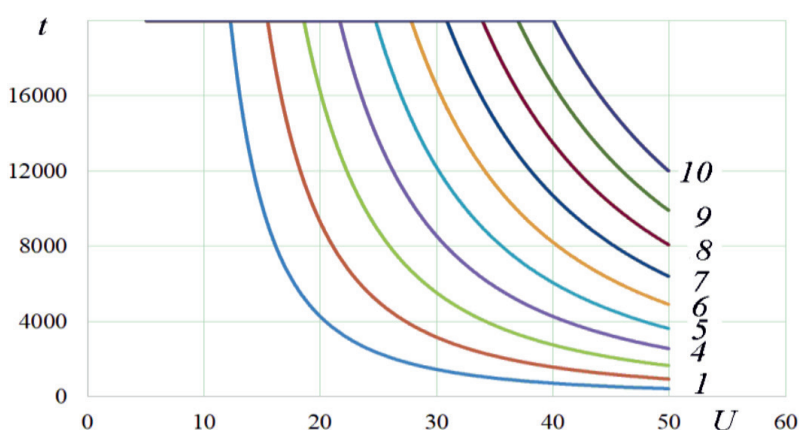


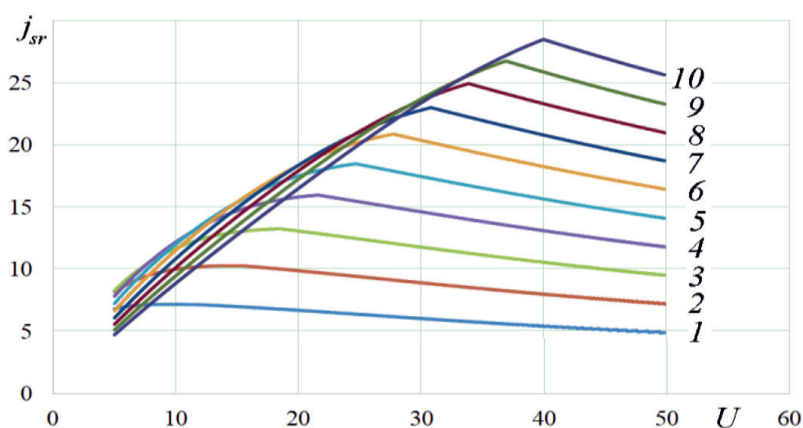
Рис. 2. Изменение относительного объемного газонаполнения  $s_g$  (а) и температуры  $T_0$  электролита (б) и проводимости  $\nu$  электролита (в) от длительности  $t_w$  протекания тока:  $\nu_0 = 10,1$ ,  $См/м$ ;  $P = 5 \cdot 10^5$ ,  $Па$ ;  $T_0 = 293$ ,  $К$



а)



б)



в)

Рис. 3. Изменение выходных показателей процесса  $j_a$ ,  $j_m$ ,  $t_w$  при различных значениях напряжения  $U$ ,  $V$  и величины зазора  $s$ , мкм: а – изменение амплитудной плотности тока в импульсе  $j_a$ ,  $A/cm^2$ ; б – изменение длительности  $t_w$  прохождения тока (до достижения предельного газонаполнения  $c_g = 0,63$ ), мкс; в – изменение средней (за период следования импульсов) плотности тока  $j_m$ ,  $A/cm^2$ .

Во всех случаях начальная проводимость электролита  $\nu_0 = 10,1$ ,  $Cm/m$ ;  $P = 5 \cdot 10^5$ ,  $Pa$ ;

$T_0 = 293$  K; кривые 1–10 на всех графиках построены для разных величин зазоров от 50 до 550 мкм соответственно, с шагом 50 мкм

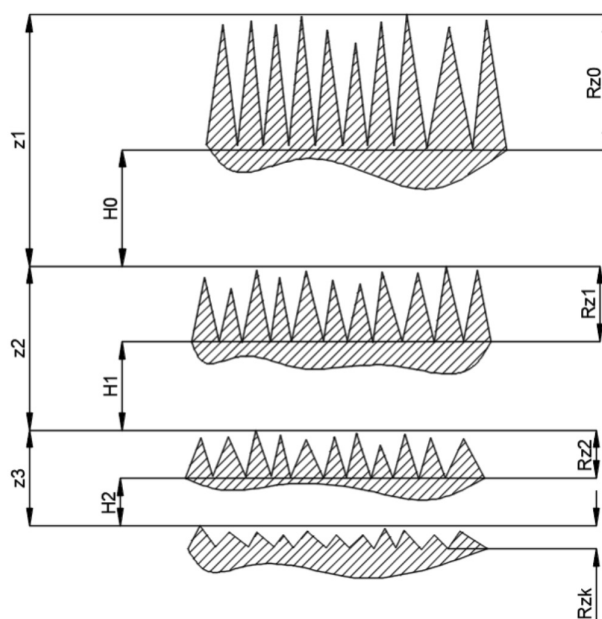


Рис. 4. Расчетная схема припусков для 3 проходов

На каждом  $i$ -м проходе ЭИ, движущегося над поверхностью с зазором  $s_i$  со скоростью  $V_{k_i}$ , формируется поверхность как результат наложения единичных следов, при этом снимается припуск  $z_i$  и формируется определенный профиль  $z(y)$  (рис. 1) с шероховатостью  $Rz_i$  и глубиной измененного слоя  $H_i$ . На каждом последующем  $i + 1$ -м проходе ЭИ сдвигался в направлении обработанной поверхности до образования с ней по оси  $O-Z$  (в точке  $y = 0$ ) величины зазора  $s_{i+1}$ .

Величина минимального припуска  $z_i$ , необходимого для удаления шероховатости и измененного слоя предшествующей  $i-1$  поверхности для формирования новой  $i$ , может быть определена по формуле:

$$z_i \geq z_i^{\min} = Rz_{i-1} + H_{i-1} + \epsilon_i + \rho_{i-1}, \quad (14)$$

где  $H_{i-1}$  – глубина измененного слоя (в случае электрохимической обработки сплавов на никелевой основе это слой с растравом по границам зерен);  $Rz_{i-1}$  – высота микронеровностей профиля по 10 точкам;  $\rho_{i-1}$  – сумма отклонений для элементарной поверхности обрабатываемой заготовки на предшествующем переходе;  $\epsilon_i$  – погрешность базирования заготовки на выполняемом переходе; индексы  $i$  и  $i-1$  обозначают соответственно текущую и предшествующую обработку.

Поскольку при электрохимической обработке физический износ электрода-инструмента (катода) практически отсут-

ствует, обработка будет вестись одним ЭИ с неизменной установкой в приспособлении при последовательном изменении режимов на проходах, величины  $\rho$ ,  $\epsilon$  принимаются равными нулю и учитываются на завершающей операции технологического процесса обработки детали.

Суммарное время  $t_{sum}$  удаления общего припуска при его разбиении на  $n$  частей

$$z_{sum} = \sum_{i=1}^n z_i$$

может быть определено как функция  $t_{sum}(\bar{U}, s_0)$  по формуле:

$$t_{sum} = L \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{V_{k_i}}, \quad (15)$$

$$V_{k_i} = \frac{K_{ecm} \eta_a N}{\pi a q z_i}, \quad (16)$$

где  $V_{k_i}$  – скорость подачи ЭИ на  $i$ -м переходе;  $m_i$  – число строк (определяется из выражения (6));  $Rz_{i-1}$ ,  $Rz_i$  – высота микронеровностей профиля для переходов  $i-1$  и  $i$ .

#### Постановка задачи оптимизация

Дана заготовка с исходной поверхностью, эквидистантной к поверхности детали, имеющая начальную шероховатость  $Rz_0$ ,

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: определить такие параметры  $(U_i, s_i)$  режима обработки на каждой части  $z_i$  припуска  $z_{sum}$  при заданном его разбиении на  $n$  частей, при которых суммарное время обработки, равное сумме времен удаления каждой части припуска  $t_{sum} = \sum_{i=1}^n t_i$ , будет минимально:  $t_{sum} = t_{optimum}$ , т.е.

при условиях:

$$Rz_k \leq Rz_{\max}, Rz_i < Rz_{i-1},$$

$$H_k \leq H_{\max}, H_i < H_{i-1},$$

$$\Delta z_i \leq \Delta z_{max}, \Delta z_i < \Delta z_{i-1},$$

и ограничениях на диапазоны изменения параметров режима (при разбиении диапазона на  $k$  частей):

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max},$$

Для расчета  $Rz_i$  и  $T_i$  могут быть использованы эмпирические зависимости (10, 11).

Величина погрешности на текущем проходе  $\Delta z_i$  может быть определена на основе следующих соображений (рис. 5):

$$\mathbf{z}_i = [s_2 + z_2(0)] - [s_1 + z_1(0)], \quad (17)$$

где  $s_1, s_2$  – соответственно зазоры между ЭИ и наиболее выступающей и наиболее вогнутой частями макрорельефа обрабатываемой поверхности;  $z_1(0), z_2(0)$  в соответствии с (2) – глубины следа ЭИ в точке  $y = 0$  для зазоров, где  $s_1, s_2; s_2 = s_1 + \Delta z_{i-1}$  соответственно.

Подставив из (2) в выражение (17) формулу для  $z(y)$  при  $y = 0$  для зазоров  $s_1, s_2$ , после преобразований получим:

$$z_i = z_{i-1} + \frac{K_{ecm} \eta_a}{\pi V_{k_i}} \left( \frac{N_2}{a_2} - \frac{N_1}{a_1} \right),$$

где  $\Delta z_p$ ,  $\Delta z_{i-1}$  – погрешность формы соответственно на данном и предшествующих проходах;  $N_1$ ,  $N_2$  – интенсивность источника (1а) для наименьшего и наибольшего зазоров соответственно,  $s_{1i-1}$ ,  $s_{2i-1}$ ;  $a_1$ ,  $a_2$  – расстояние до эквивалентного источника (1в), соответственно для наименьшего и наибольшего зазоров  $s_1$ ,  $s_2$ .

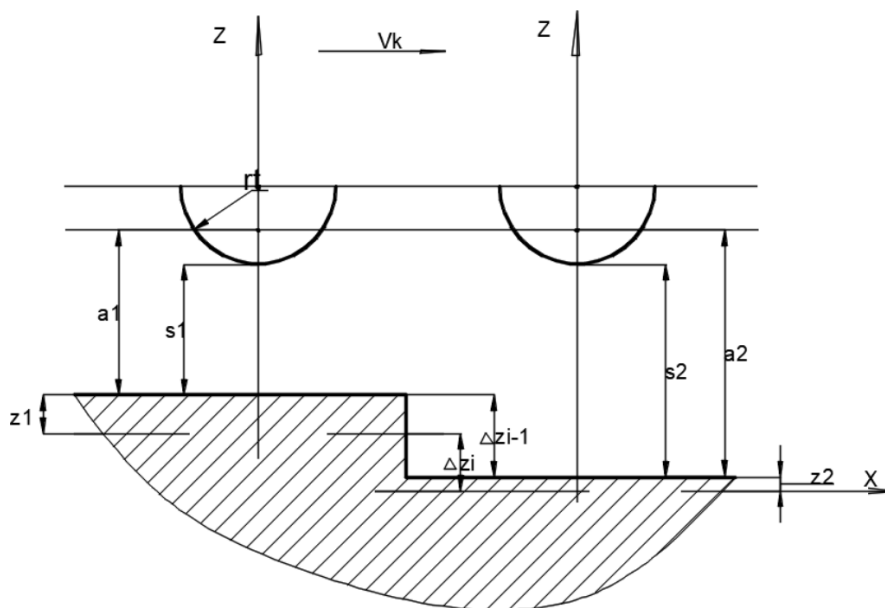


Рис. 5. Схема формирования погрешности

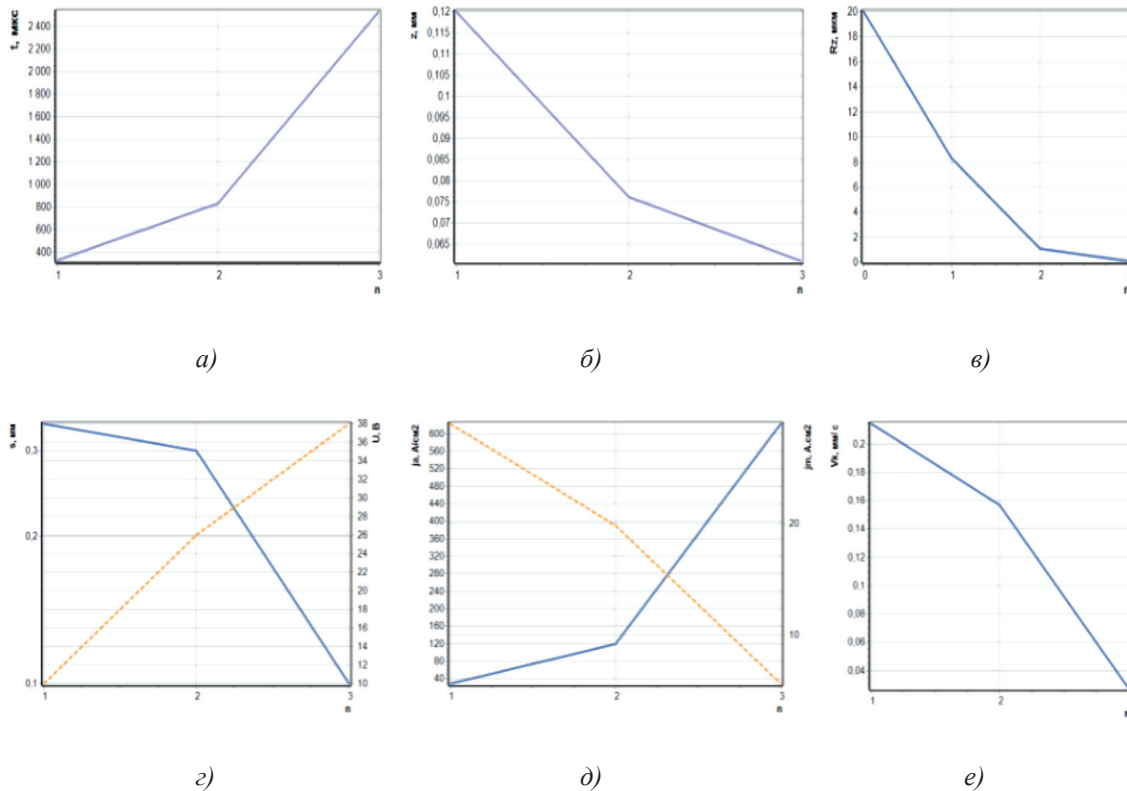


Рис. 6. Пример результатов расчета оптимальных режимов при трех ( $i = 1..n$ ) проходах удаления суммарного припуска  $z_{sum}$ : а – время  $t$  удаления каждой  $i$ -й части припуска; б – величины припусков, снимаемых на каждом  $i$ -м проходе  $z_i$ ; в – шероховатость обработанной поверхности, достигаемой на каждом  $i$ -м проходе  $Rz_i$ ; г – величины межэлектродных зазоров  $s_i$  (сплошная кривая) и напряжений  $U_i$  (пунктирная кривая) на каждом проходе; д – амплитудная  $j_a$  (сплошная кривая) и средняя  $j_m$  за период (пунктирная кривая) плотности токов; е – скорость подачи ЭИ на каждом проходе  $Vk_i$

Пример расчета оптимальных режимов при разбиении припуска на три ( $n = 3$ ) части приведен на рис. 6. Расчет производился по представленной выше математической модели в следующих диапазонах входных параметров  $U_k, s_{0k}, k = 1, \dots, m, (m = 10)$

$$10 \leq U_k \leq 50, \text{ с шагом } 10 \text{ В};$$

$$50 \leq s_{0k} \leq 500, \text{ с шагом } 50 \text{ мкм}.$$

На рис. 6 показано изменение оптимальных параметров процесса при переходе от первого прохода к последнему.

Показано, в частности, что к последнему происходит увеличения напряжения  $U$  и уменьшение межэлектродного зазора  $s$  (рис. 6г), что вызвано требованиями снижения шероховатости  $Rz$ , измененного слоя  $H$  и погрешности  $\Delta z$ , соответственно изменению отношения  $U/s$  по уравнениям (7)–(9) увеличивается амплитудный  $j_a$  и уменьшается средний ток  $j_m = \frac{1}{T} \int_0^T j_a dt$  (рис. 6д).

При этом, несмотря на уменьшение припуска  $z$  (рис. 6б), уменьшается скорость подачи  $V_k$  (рис. 6е) и увеличивается время обработки  $t$  (рис. 6а).

Величины снимаемых припусков  $z_i$  на каждом проходе могут быть использованы для определения суммарного припуска  $z_{sum}$  при проектировании операционной заготовки.

### Выводы

Разработана математическая модель последовательно-строчной многопроходной электрохимической обработки стержневым ЭИ с полусферическим рабочим торцом. Использование этой модели позволило поставить и решить задачу оптимизации параметров режима многопроходной обработки для достижения минимального времени выполнения операции.

Показано, что требование уменьшения шероховатости поверхности требует увеличения плотности тока, вместе с тем сред-

ний ток и скорость подачи соответственно увеличиваются, так как за счет процессов нагрева и вскипания электролита уменьшается эффективная длительность  $t_w$  действия тока.

Показано, что разбиение припуска на  $n$  частей позволяет снизить суммарное время обработки, так как дает возможность осуществить обработку первых слоев с наибольшей производительностью. Однако при увеличении количества проходов более  $n > 3$  суммарное время существенно не изменяется.

Приведен пример расчета оптимальных параметров режима и припусков в практической области изменения параметров.

*Работа проведена при финансовой поддержке по гранту РФФИ (код проекта 17-07-00356).*

### Список литературы

1. Yongbin Zeng, Qia Yu, Xiaolong Fang, Kun Xu, Hansong Li, Ningsong Qu Wire electrochemical machining with monodirectional traveling wire. Springer-Verlag, London, 2015. 347 p.
2. Qu Ningsong, Fang Xiaolong, Li Wei, Zeng Yongbin, Zhu Di Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy. Chinese Journal of Aeronautics. 2013. No. 26 (1). P. 224–229.
3. Volgin V.M., Lyubimov V.V., Gnidina I.V., Davydov A.D., Kabanov T.B. Effect of Current Efficiency on Electrochemical Micromachining by Moving Electrode. Procedia CIRP. 2016. Vol. 55. P. 65–70. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.031.
4. Житников В.П., Зайцев А.Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
5. Зайцев А.Н., Житников В.П. Электрохимическая обработка выпуклости сварного соединения непрофилированным электродом-инструментом // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 7. С. 44–50.
6. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Л.: Машиностроение, 1971. 544 с.