

Энгельсский технологический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени
Гагарина Ю.А.»

РАЗМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Методические указания к выполнению практических работ
по дисциплине «Технология размерной обработки
электрофизическими электрохимическими методами»
для студентов направления

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

очной и заочной форм обучения

Общие сведения

В основе процесса ЭХО находится анодное растворение металла в среде электролита под действием электрического тока. Основным технологическим показателем этого процесса является скорость растворения

$$V_{\text{э.х.р}} = \frac{(\eta \varepsilon \chi U)}{(\rho_m s)} \text{ м/с}, \quad (1)$$

где η - коэффициент выхода по току, характеризующий долю полезного использования тока $\eta = 0,6 \dots 0,95$ в зависимости от обрабатываемых материалов);

ε - электрохимический эквивалент, кг/А·с;

χ - удельная электропроводимость электролита, См/м (См - сименс, электрическая проводимость проводника сопротивлением 1 Ом);

U - напряжение, В;

ρ_m - плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

s - межэлектродный зазор, м.

Существуют две основные схемы ЭХО, а именно, с неподвижным электродом-инструментом и с подвижным электродом-инструментом (рис. 1).

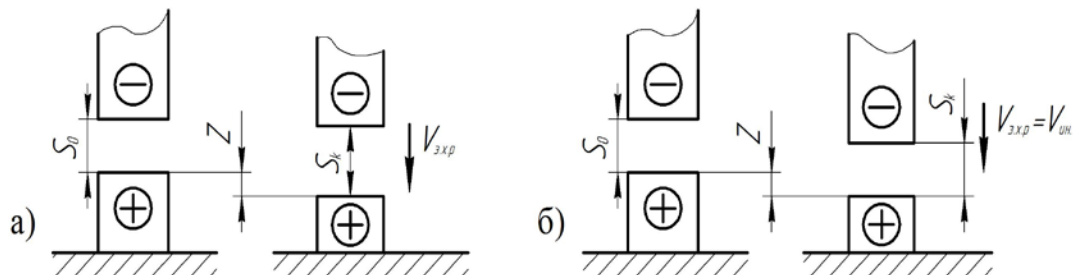


Рис. 1- Схема ЭХО: а) с неподвижным электродом-инструментом; б) с подвижным электродом-инструментом

По схеме с неподвижным электродом-инструментом s_0 и s_k - межэлектродные промежутки в начале и в конце процесса, а Z - технологический припуск. По этой схеме с увеличением межэлектродного промежутка уменьшаются скорость и производительность анодного растворения.

Если обозначить приращение межэлектродного зазора ds за время $d\tau$, то скорость одного растворения металла будет

$$\frac{ds}{d\tau} = \frac{\eta \varepsilon \chi U}{\rho_m s}. \quad (2)$$

Из данного выражения определяем время, необходимое для удаления припуска на обработку,

$$\tau = \int_{s_0}^{s_k} \frac{s}{\eta \varepsilon \chi U / \rho_m} ds = \frac{s_k^2 - s_0^2}{2 \eta \varepsilon \chi U / \rho_m}. \quad (3)$$

Среднюю скорость анодного растворения при неподвижных электродах-инструментах находим из выражения

$$v_{cp.э.х.р} = \frac{Z}{\tau}. \quad (4)$$

Время, за которое снимается припуск на обработку, является основным временем ($t_0 = \tau$).

По схеме с подвижным электродом-инструментом, (рис. 1,б) межэлектродный зазор s_0 остаётся постоянным.

Скорость одного растворения равна скорости инструмента и определяется по формуле 1. Основное время ЭХО определяется из выражения

$$t_0 = \frac{Z}{v_{э.х.р}}. \quad (5)$$

Производительность процесса ЭХО для обеих систем находим из выражения

$$Q = \frac{SZ}{t_0}, \quad (6)$$

где S - площадь обрабатываемой поверхности.

Для правильного выбора источника питания ЭХО, необходимо знать силу выходного тока, которую определяем по формуле

$$I = \frac{v_{э.х.р} S \rho_m}{(\varepsilon \eta)} [A]. \quad (7)$$

Определение гидродинамических параметров ЭХО

Для обеспечения стабильности съёма металла с заготовки необходимо иметь скорость потока электролита, достаточную для выноса из межэлектродного промежутка отходов обработки. Скорость электролита определяем по формуле

$$v_{э} \geq \frac{k^2 v l_p \eta^2 \varepsilon^2 \chi^2 U^2}{\rho_0^2 D^2 (C_a - C_{ex})^2 s^2 (v/D)^{2/3}} \text{ м/с}, \quad (8)$$

где $k = 4,64$ - безразмерный коэффициент;

v - кинематическая вязкость электролита в пределах диффузионного слоя ($v = 1,2...18$ мм/с);

l_p - длина участка заготовки, на котором происходит анодное растворение в направлении течения электролита;

η - коэффициент выхода по току;

ε - электрохимический эквивалент;

χ - удельная электропроводимость электролита;

ρ_0 - плотность электролита вместе с продуктами обработки (она превышает плотность электролитов и принимается $\rho_0 = 2500...3000 \text{ кг/м}^3$);

D - коэффициент диффузии, изменяющийся в зависимости от концентрации электролита и его температуры, $\text{м}^2/\text{с}$ (характеризует диффузионный слой, приэлектродный, в котором концентрация переменна);

C_a - массовая концентрация продуктов обработки на аноде ($C_a = 0,92...0,97$);

C_{ex} - массовая концентрация продуктов обработки в электролите на входе в межэлектродный зазор, зависящий от степени очистки элемента ($C_{\text{ex}} = 0,02...0,005$);

s - межэлектродный зазор.

Если длина участка обработки по направлению потока электролита достаточно велика ($l_p > 300s$), то после определения скорости элемента по формуле делают проверочный расчёт, учитывающий нагрев электролита, по следующей формуле

$$V_s = \frac{J^2 l_p}{(\chi \rho_s C \Delta T)} [\text{м/с}], \quad (9)$$

где J - плотность тока, А/м^2 , $\left(J = \frac{U\chi}{S} \right)$;

ρ_s - средняя плотность электролита;

C - удельная теплоёмкость электролита;

ΔT - разность температур на выходе из зазора ($T_{\text{вых}}$) и на входе в него (T_{ex}).

Окончательно рабочую скорость электролита определяют из условия

$$V_{s,p} = \max\{v_s, v'_s\}. \quad (10)$$

Для прокачки электролита и выноса продуктов обработки из межэлектродного промежутка применяют специальные насосы (например, центробежные). Для подбора промышленного насоса необходимо рассчитывать его напор и подачу.

Подачу насоса определим из выражения

$$Q_n = k_n V_{s,p} S_n [\text{м}^3/\text{с}], \quad (11)$$

где k_n - коэффициент, учитывающий степень изнашиваемости насоса ($k_n = 1,5...2,0$);

S_n - площадь поперечного сечения межэлектродного промежутка.

Для нахождения напора насоса (H) необходимо знать перепады давления (Δp и Δp_2) на входе в межэлектродный промежуток и на выходе из него, для перемещения электролита и газообразных продуктов

обработки. Кроме того, следует учесть местные потери ($\Delta H_{\text{мес}}$), путевые потери ($\Delta H_{\text{пут}}$), противодействия на выходе ($p_{\text{вых}}$) и дополнительный напор ($\Delta H_{\text{дон}}$) для перемещения электролита от насоса к заготовке и вдоль неё.

$$H = \frac{(\Delta p + \Delta p_2 + p_{\text{вых}})}{(\rho g) + \sum \Delta H_{\text{пут}} + \sum \Delta H_{\text{мес}} + \Delta H_{\text{дон}}}, \quad (12)$$

где ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

Перепад давления находим через среднюю скорость электролита

$$\Delta p = \frac{12 \mu l_p v_{\text{э.п}}}{s^2} \text{ Па}, \quad (13)$$

где μ - динамическая вязкость, кг/(с·м)

s - величина зазора.

Перепад давления, необходимый для выноса газообразных продуктов обработки (водорода), находим по формуле

$$\Delta p_{\text{э}} = \sqrt{\frac{p_{\text{вых}}^2}{2} + k J S p_{\text{вых}}} + \frac{p_{\text{вых}}}{2} \text{ Па}, \quad (14)$$

где $p_{\text{вых}}$ - противодействие на выходе электролита из зазора, создаваемая для устранения разрыва струи ($p_{\text{вых}} \leq 150$ кПа);

k - коэффициент, увеличивающий в соотношении между объёмом твёрдых и газообразных продуктов обработки ($k = 0,11 \dots 0,12$);

J - плотность тока $\left(\frac{J}{S}\right)$, А/м²;

S - площадь обрабатываемой поверхности.

Путевые потери $\Delta H_{\text{пут}}$ зависят от конструкции трубопроводов, их длины, скорости и вязкости электролита и рассчитываются для конкретных условий.

Местные потери напора рассчитывают по значениям коэффициентов местных сопротивлений трубопровода ξ и скорости жидкости

$$\sum \Delta H_{\text{мес}} = \sum_{i=1}^n \frac{\xi v_{\text{э}i}^2}{(2g)}. \quad (15)$$

Дополнительный напор зависит от высоты расположения насоса относительно обрабатываемой заготовки (H_1) и положения заготовки при обработке (H_2):

$$\Delta H_{\text{дон}} = \pm H_1 \pm H_2. \quad (16)$$

В таблице 1 приведены значения скоростей и напоров электролита, рекомендуемые для различных схем ЭХО.

Таблица 1 -Значения скоростей и напоров электролита

№	Схема обработки	Скорость электролита v , м/с	Противодавление $P_{вых}$, Па	Напор насоса H , м
1	Обработка неподвижным электродом-инструментом	12...20	$(0,2...0,5) \cdot 10^5$	30...80
2	Прошивание: мелких полостей крупных полостей	6...10 10...16	$(1...1,5) \cdot 10^5$ $(0,5...0,8) \cdot 10^5$	100...150 30...80
3	Точение	10...15	$(0,1...0,5) \cdot 10^5$	30...50
4	Протягивание	9...18	$(0,2...1,5) \cdot 10^5$	40...80
5	Разрезание: диском электродом-проволокой	10...12 6...18	— —	— —
6	Шлифование	12...15	$(0,2...0,5) \cdot 10^5$	30...80

Из каталога серийно выпускаемых насосов подбирают насос с характеристиками, близкими к расчётным.

Оценка точности ЭХО

Точность размеров и формы детали (рис.2) зависят от погрешности электрода - инструмента и от погрешностей, вызванных отклонениями режимов ЭХО (колебание электродинамических параметров, изменение свойств электролита, колебание температуры и т.д.). Значительное влияние на точность детали оказывает колебание припуска заготовки. В конце обработки погрешность детали $\Delta_{дет}$ должна быть в пределах допуска на деталь $[\delta_{дет}]$, ($\Delta_{дет} \leq \delta_{дет}$).

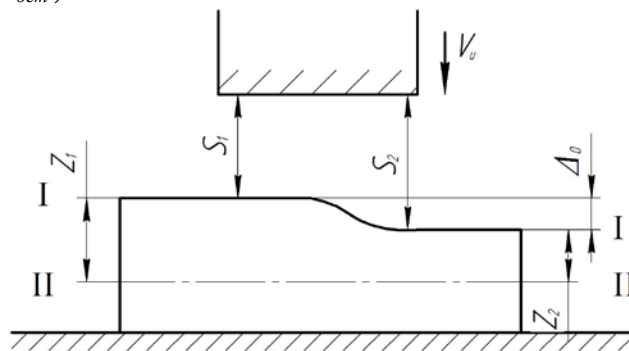


Рис. 2- Схема образования погрешности обработки: I-I - контур исходной заготовки; II-II - контур детали

По схеме с неподвижным электродом-инструментом погрешность детали определяем по формуле

$$\Delta_{дет} = \sqrt{(s_0 \Delta_0)^2 + 2\eta_1 \varepsilon_1 \chi_1 U_1 \tau_1 / \rho_{м1}} - \sqrt{s_0^2 + 2\eta \varepsilon U \tau / \rho_{м}}, \quad (17)$$

где Δ_0 - погрешность заготовки.

В формуле 17 первая составляющая характеризует реальный размер обработки с учётом погрешности заготовки и колебаниями параметров ЭХО, а вторая составляющая показывает ожидаемый номинальный размер обработки.

По схеме с подвижным электродом-инструментом погрешность детали находим из выражения

$$\Delta_{det} = \frac{2\eta'\varepsilon'\chi'U'\tau'}{\rho'_m(2z + \Delta_0)} - \frac{\eta\varepsilon\chi U\tau}{\rho_m z}. \quad (18)$$

Для случая идеального процесса ЭХО на погрешность обработки оказывает влияние только погрешность заготовки, тогда при постоянной скорости электрода-инструмента формулу 18 приведем в виде

$$\Delta_{det} = \frac{\eta\chi\varepsilon U}{\rho_m v_{ин}} \left(\frac{2}{2 + \frac{\Delta_0}{z}} - 1 \right). \quad (19)$$

Наибольшее влияние на общую погрешность обработки оказывают: нестабильность электропроводности электрода, колебания зазора и выхода по току (до 50 % от общей погрешности); отклонения от расчётного режима течения электролита (до 20 %); упругие и температурные деформации (до 15 %); погрешности настройки и установки (до 15 %).

Определение основных технологических параметров процесса ЭХО

Задача. По схемам с неподвижным и подвижным электродами-инструментами определить основные технологические и гидродинамические параметры и погрешность обработки при изготовлении методом ЭХО паза в пластине из стали 65Г (55...60HRC) (рис. 3) при следующих условиях:

- состав электролита NaCl (25 %);
- коэффициент выхода по току $\eta = 0,9$;
- электрохимический эквивалент $\varepsilon = 0,223 \cdot 10^{-6}$ кг/(А·с);
- удельная электропроводимость электролита $\chi = 16,06$ См/м;
- плотность обрабатываемого материала $\rho_m = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³;
- плотность продуктов обработки в электролите $\rho_0 = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³;
- массовая концентрация продуктов обработки на аноде $C_a = 0,92$;
- массовая концентрация продуктов обработки в электролите $C = 0,02$;
- безразмерный коэффициент $k = 4,64$;
- динамическая вязкость электролита $\mu = 4,8 \cdot 10^{-3}$ кг/с·м;
- кинематическая вязкость электролита $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м/с;

- коэффициент диффузии $D = 5,624 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$;
- начальный межэлектродный зазор $s_0 = 10^{-3} \text{ м}$;
- напряжение $U = 10 \text{ В}$;
- длина обработки $0,1 \text{ м}$;
- погрешность заготовки $\Delta_0 = 0,5 \text{ мм}$;
- обрабатываемая заготовка установлена на 1 м выше насоса для прокачки электролита.

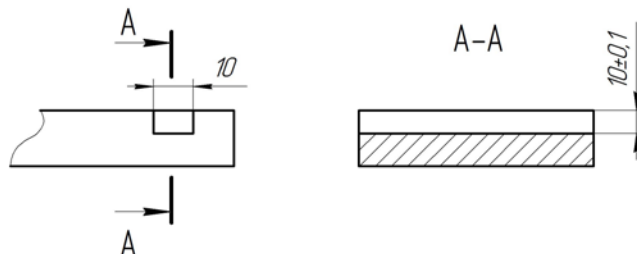


Рис. 3- Эскиз обрабатываемой детали

Решение:

Определяем скорость анодного растворения, основное время и производительность ЭХО.

а). Схема с подвижным электродом-инструментом

Скорость одного растворения и скорость перемещения электрода-инструмента определяем по формуле 2:

$$V_{\text{э.х.р.}} = V_{\text{ин}} = \frac{\eta \varepsilon \chi U}{\rho_m s_0} = \frac{0,9 \cdot 0,223 \cdot 10^{-6} \cdot 16,06 \cdot 10}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 0,413 \cdot 10^{-5} \text{ м/с} = 0,247 \text{ мм/мин.}$$

Основное время находим по формуле:

$$t_0 = V \cdot \frac{z}{v_{\text{э.х.р.}}} = \frac{10}{0,247} = 40,5 \text{ мин.}$$

Производительность процесса определяем по формуле:

$$Q = \frac{Sz}{t_0} = \frac{100 \cdot 10 \cdot 10}{40,5} = 246,913 \text{ мм}^3/\text{мин.},$$

где $S = 100 \cdot 10 \text{ мм}^2$.

б). Схема с неподвижным электродом-инструментом

Скорость анодного растворения по мере съёма припуска будет уменьшаться по гиперболической зависимости. Поэтому для нахождения средней скорости определяем время, необходимое для удаления припуска, равное основному времени, по формуле:

$$t = \tau = \frac{s_k^2 - s_0^2}{2\eta \varepsilon \chi U / \rho_m} = \frac{(0,01)^2 - (0,001)^2}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,223 \cdot 10^{-6} \cdot 16,06 \cdot 10 / 7,8 \cdot 10^3} = 11979,6 \text{ с} = 199,6 \text{ мин.}$$

Находим среднюю скорость ЭХО по формуле:

$$v_{\text{ср.э.х.р.}} = \frac{Z}{\tau} = \frac{10}{199,6} = 0,05 \text{ мм/мин.}$$

Производительность ЭХО по данной схеме

$$Q = \frac{Sz}{t_0} = \frac{100 \cdot 10 \cdot 10}{199,6} = 50,1 \text{ мм}^3/\text{мин.}$$

По формуле определяем силу выходного тока, которая будет одинаковой для схем с подвижным и с неподвижным электродами-инструментами:

$$I = \frac{v_{\text{э.х.р}} S \rho_m}{\varepsilon \eta} = \frac{0,413 \cdot 10^{-5} \cdot 0,001 \cdot 7,8 \cdot 10^3}{0,223 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9} = 160 \text{ А.}$$

Определяем гидродинамические параметры процесса ЭХО.

Находим скорость потока электролита (по формуле):

$$v_{\text{э}} \geq \frac{k^2 v l_p \eta^2 \varepsilon^2 \chi^2 U^2}{\rho_0^2 D^2 (C_a - C_{\text{вх}})^2 s^2 (v/D)^{2/3}} =$$

$$= \frac{4,64^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 0,9^2 (0,223 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 16,06^2 \cdot 10^2}{(2,8 \cdot 10^3)^2 \cdot (5,624 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 1^2 \cdot (1,5 \cdot 10^{-6} / 5,624 \cdot 10^{-10})^{2/3}} \geq 8,57 \text{ м/с.}$$

Так как по условию задачи длина участка обработки $l_p < 300s_0$, то проверочный расчёт по формуле не проводим.

Примем рабочую скорость электролита $V_{\text{э.р}} = 9 \text{ м/с}$. Эта скорость потока электролита должна обеспечить полный вынос продуктов обработки по схемам с неподвижным и подвижным электродами-инструментами.

Определяем подачу насоса по формуле (примем $k_n = 2$):

а) по схеме с подвижным электродом-инструментом

$$Q_n = k_n v_{\text{э.р}} S_n = 2 \cdot 9 \cdot 10^{-5} = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.}$$

где $S_n = 1 \cdot 10 = 10 \text{ мм}^2 = 10^{-5} \text{ м}^2$ - площадь поперечного сечения межэлектродного промежутка при $S_0 = 1 \text{ м}$;

б) по схеме с неподвижным электродом-инструментом

$$Q_n = 2 \cdot 9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = 0,198 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с.}$$

где $S_n = 11 \cdot 10 = 110 \text{ мм}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ - площадь максимального поперечного сечения межэлектродного промежутка при $S_k = 11 \text{ м}$.

Определяем необходимый напор насоса H по формуле 1, для чего предварительно находим:

- перепад давления, по формуле 2:

$$\Delta p = \frac{12 \mu l_p v_{\text{э.р}}}{s_0^2} = \frac{12 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 9}{(10^{-3})^2} = 0,5184 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

- перепад давления для выноса газообразных продуктов, по формуле 3:

$$\Delta p_{\text{э}} = \sqrt{\frac{p_{\text{вх}}^2}{2} + k J S p_{\text{вх}}} + \frac{p_{\text{вх}}}{2} =$$

$$= \sqrt{\frac{(1,6 \cdot 10^5)^2}{2} + 0,12 \cdot \frac{160}{10^{-3}} \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^5 + \frac{1,6 \cdot 10^5}{2}} = 2,059 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

где примем $p_{\text{блх}} = 160 \cdot 10^3 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $k = 0,12$;

$$J = \frac{J}{S} = \frac{160}{10^{-3}} = 1,6 \cdot 10^5; (S = 10^{-3} \text{ м}^2).$$

Так как путевые и местные потери достаточно малы, то в практических расчётах их можно не учитывать, тем более что в условии задачи не указаны значения коэффициентов местных сопротивлений.

Находим напор насоса:

$$H = \frac{\Delta p + \Delta p_2 + p_{\text{блх}}}{\rho g} + \Delta H_{\text{дон}} =$$

$$= \frac{0,5184 \cdot 10^5 + 2,059 \cdot 10^5 + 1,6 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8} + 1 = 16,2 \text{ м}.$$

Произведём оценку точности ЭХО по погрешности заготовки (без учёта погрешностей всех прочих параметров).

а) По схеме с неподвижным электродом-инструментом погрешность детали определяем по формуле 6:

$$\Delta_{\text{дем}} = \sqrt{(s_0 + \Delta_0)^2 + a} - \sqrt{s_0^2 + a} =$$

$$= \sqrt{(10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 0,223 \cdot 10^{-6} \cdot 16,06 \cdot 10 \cdot 11979,6}{7,8 \cdot 10^3}} -$$

$$- \sqrt{(10^{-3})^2 + \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 0,223 \cdot 10^{-6} \cdot 16,06 \cdot 10 \cdot 11979,6}{7,8 \cdot 10^3}} = 0,077 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$= 0,077 \text{ мм},$$

где $a = \frac{2\eta\epsilon\chi U_{\tau}}{\rho_m}$ - величина постоянная, согласно условию задачи.

б) По схеме с подвижным электродом-инструментом погрешность детали определяем по формуле 8:

$$\Delta_{\text{дем}} = \frac{\eta\chi\epsilon U}{\rho_m v_{\text{ин}}} \left(\frac{2}{2 + \frac{\Delta_0}{z}} - 1 \right) = \frac{0,9 \cdot 0,223 \cdot 16,06 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,413 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{2}{2 + \frac{0,5}{10}} - 1 \right) =$$

$$= 0,024 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,024 \text{ мм}.$$

Таким образом, в обоих случаях погрешность ЭХО, возникающая из-за погрешности заготовки, находится в пределах допуска на изготовление ($\pm 0,1$).

Список литературы

1. Артамонов Б.А. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов[Текст]: учебное пособие В 2 т. М.: Высшая школа, 1983.-326с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки[Текст]: / Под ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1988.-719с.