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

Энгельс 2026

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

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

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

ε -электрохимический эквивалент, кг/А·с;

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

U - напряжение, В;

$\rho_м$ - плотность обрабатываемого материала, кг/м^3;

s - межэлектродный зазор, м.

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

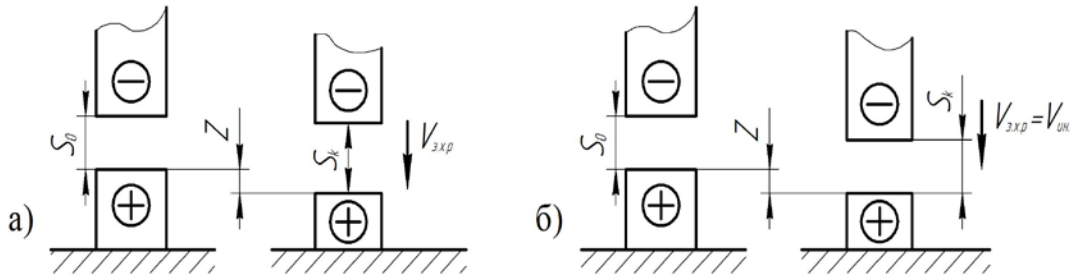

Рис. 1- Схема ЭХО: а) с неподвижным электродом-инструментом; б) с подвижным электродом-инструментом

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

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

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

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

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

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

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

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

Определение гидродинамических параметров ЭХО

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

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

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

ν - кинематическая вязкость электролита в пределах диффузионного слоя ($\nu = 1{,}2...18$ 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 $\rho_0 = 2500...3000$ кг/м^3);

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

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

$C_{вх}$ - массовая концентрация продуктов обработки в электролите на входе в межэлектродный зазор, зависящий от степени очистки элемента ($C_{вх}$ = 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

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

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

$\rho_э$ - средняя плотность электролита;

C - удельная теплоёмкость электролита;

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

Окончательно рабочую скорость электролита определяют из условия

$$V_{э.р} = \max\{v_э, v'_э\}. \qquad (10$$

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

$$Q_н = k_н V_{э.р} S_п \text{ [м}^3\text{/с]}, \qquad (11)$$

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

$S_п$ - 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 ($\Delta H_{мес}$), путевые потери ($\Delta H_{пут}$), противодавления на выходе ($p_{вых}$) и дополнительный напор ($\Delta H_{доп}$) для перемещения электролита от насоса к заготовке и вдоль неё.

$$H = \frac{\left(\Delta p + \Delta p_2 + p_{вых}\right)}{\left(\rho g\right) + \sum \Delta H_{пут} + \sum \Delta H_{мес} + \Delta H_{доп}}, \qquad (12)$$

где ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

Перепад давления находим через среднюю скорость электролита

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

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

s - величина зазора.

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

$$\Delta p_г = \sqrt{\frac{p_{вых}^2}{2} + kJSp_{вых}} + \frac{p_{вых}}{2} \text{ Па}, \qquad (14)$$

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

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

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

S - площадь обрабатываемой поверхности.

Путевые потери $\Delta H_{пут}$ 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

$$\sum \Delta H_{мес} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\xi v_{эi}^2}{\left(2g\right)}. \qquad (15)$$

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

$$\Delta H_{доп} = \pm H_1 \pm H_2. \qquad (16)$$

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 $v_э$, м/с	Противодавление $P_{вых}$, Па	Напор насоса H, м
1	Обработка неподвижным электродом-инструментом	12…20	$(0,2…0,5)\cdot10^5$	30…80
2	Прошивание: мелких полостей крупных полостей	 6…10 10…16	 $(1…1,5)\cdot10^5$ $(0,5…0,8)\cdot10^5$	 100…150 30…80
3	Точение	10…15	$(0,1…0,5)\cdot10^5$	30…50
4	Протягивание	9…18	$(0,2…1,5)\cdot10^5$	40…80
5	Разрезание: диском электродом-проволокой	 10…12 6…18	 — —	 — —
6	Шлифование	12…15	$(0,2…0,5)\cdot10^5$	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 $[\delta_{дет}]$, $(\Delta_{дет} \le \delta_{дет})$.

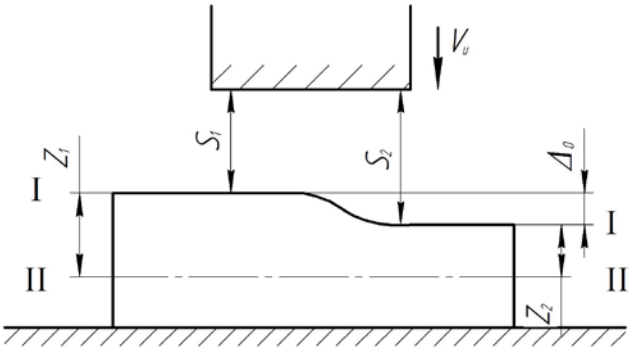

Рис. 2- Схема образования погрешности обработки: I-I - контур исходной заготовки; II-II - контур детали

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

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

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

$$\Delta_{дет} = \frac{2\eta'\varepsilon'\chi'U'\tau'}{\rho'_м\left(2z+\Delta_0\right)} - \frac{\eta\varepsilon\chi U\tau}{\rho_м z}. \qquad (18)$$

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

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

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...60*HRC*) (рис. 3) при следующих условиях:

- состав электролита NaCl (25 %);
- коэффициент выхода по току η = 0,9;
- электрохимический эквивалент $\varepsilon = 0{,}223\cdot10^{-6}$ кг/(А·с);
- удельная электропроводимость электролита $\chi = 16{,}06$ См/м;
- плотность обрабатываемого материала $\rho_м = 7{,}8\cdot10^{3}$ кг/м^3;
- плотность продуктов обработки в электролите $\rho_0 = 2{,}8\cdot10^{3}$ кг/м^3;
- 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 $\mu = 4{,}8\cdot10^{-3}$ кг/с·м;
- кинематическая вязкость электролита $\nu = 1{,}5\cdot10^{-6}$ м/с;

- коэффициент диффузии $D = 5{,}624 \cdot 10^{-10}$ м^2/с;

- начальный межэлектродный зазор $s_0 = 10^{-3}$ м;

- напряжение U = 10 В;

- длина обработки 0,1 м;

- погрешность заготовки $\Delta_0 = 0{,}5$ мм;

- обрабатываемая заготовка установлена на 1 м выше насоса для прокачки электролита.

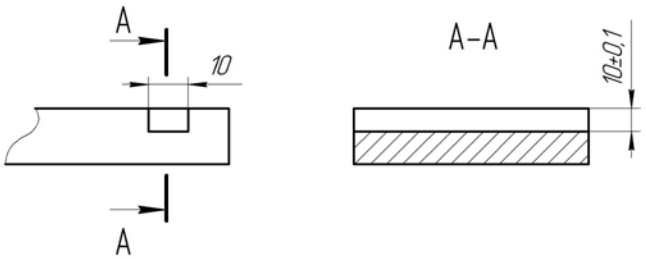

Рис. 3- Эскиз обрабатываемой детали

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:

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

Основное время находим по формуле:

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

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 $S = 100 \cdot 10$ 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:

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

Находим среднюю скорость ЭХО по формуле:

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

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:

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

Определяем гидродинамические параметры процесса ЭХО.

Находим скорость потока электролита (по формуле):

$$v_э \geq \frac{k^2 \nu l_p \eta^2 \varepsilon^2 \chi^2 U^2}{\rho_0^2 D^2 \left(C_a - C_{вх}\right)^2 s^2 \left(\nu / D\right)^{2/3}} =$$

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

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

Примем рабочую скорость электролита $V_{э.р} = 9$ 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 $k_н = 2$):

а) по схеме с подвижным электродом-инструментом

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

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

б) по схеме с неподвижным электродом-инструментом

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

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

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

- перепад давления, по формуле 2:

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

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

$$\Delta p_г = \sqrt{\frac{p_{вых}^2}{2} + kJSp_{вых}} + \frac{p_{вых}}{2} =$$

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

где примем $p_{вых}=160\cdot 10^3=1{,}6\cdot 10^5$ 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:

$$H=\frac{\Delta p+\Delta p_2+p_{вых}}{\rho g}+\Delta H_{доп}=$$

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

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:

$$\Delta_{дет}=\sqrt{\left(s_0+\Delta_0\right)^2+a}-\sqrt{s_0^2+a}=$$

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

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

$$=0{,}077\ \text{мм},$$

где $a=\dfrac{2\eta\varepsilon\chi U_\tau}{\rho_м}$ -величина постоянная, согласно условию задачи.

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

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

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

Таким образом, в обоих случаях погрешность ЭХО, возникающая из-за погрешности заготовки, находится в пределах допуска на изготовление (±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.