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

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА (ЭЭО)

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

Сущность электроэрозионной обработки заключается в удалении припуска с заготовки в среде диэлектрика за счёт микроразрядов, расплавляющих частицы металла.

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных многократных электрических разрядов между двумя электродами, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой - электродом-инструментом (ЭИ). Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев расплавление и частичное испарение металла - электрическая эрозия. Для получения высокой температуры в ограниченной области малого съема необходима большая концентрация энергии. Достижение этой цели осуществляется использованием импульсного напряжения, а ЭЭО осуществляется в жидкой среде, которая заполняет зазор между электродами, называемый межэлектродным промежутком (МЭП), или межэлектродным зазором. Схема электроэрозионной обработки показана на рис. 1. Электроды, один из которых является обрабатываемой деталью 1, а другой -инструментом 2, подключаются к генератору электрических импульсов и погружаются в диэлектрическую жидкость 3. При сближении электродов на достаточно малое расстояние происходит пробой межэлектродной среды в месте с наибольшей напряженностью электрического поля. Диэлектрическая прочность промежутка в месте пробоя нарушается, и образуется тонкий токопроводящий канал 4, замыкающий электроды. По образовавшемуся токопроводящему каналу протекает импульс тока большой плотности, канал разряда расширяется, при этом температура в зоне разряда достигает нескольких тысяч градусов. Участки электродов 5 и 7 в зоне разряда расплавляются и испаряются. Под воздействием высоких температур жидкость в зоне разряда разлагается и испаряется и вместе с парами металла образует быстро расширяющийся пузырь 6.

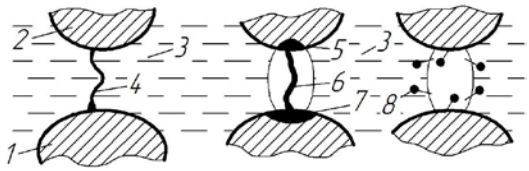

Рис 1- Схема электроэрозионной обработки

При уменьшении тока, проходящего через электроды, давление паров в расширяющемся газовом пузыре падает. В результате снижения давления расплавленный металл вскипает и выбрасывается в виде мелких капель 8 в окружающую среду (жидкость), где и застывает в виде мелких частиц.

Твердые продукты эрозии выносятся из межэлектродного промежутка под действием ударных волн и течений жидкости, вызванных электрическим разрядом и образованием шарового пузыря с последующим его расширением. На поверхностях электродов в месте прохождения разряда образуются лунки. Размеры лунок зависят в основном от энергии и длительности импульсов и электроэрозионной стойкости материала. Для получения размерной обработки энергия в зону обработки вводится отдельными порциями в виде электрических импульсов достаточно малой длительности. В паузах между импульсами рабочая жидкость восстанавливает свои диэлектрические свойства (деионизируется). Если осуществлять непрерывный подвод энергии, то будут разогреваться и плавиться большие объемы материала с одного из электродов, даже если материалы электродов одинаковы. Направленность съема материала определяется полярностью подключения электродов к генератору импульсов и параметрами импульсов. При подаче синусоидального импульса напряжения на электроды (рис. 2) на участке 0...1 напряжение увеличится до $U_{пр}$, при котором нарушается диэлектрическая прочность промежутка. Среднее напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, почти линейно зависит от величины этого промежутка и на чистовых режимах составляет 40...50В, а на черновых 70...80В. Участок 1…2 соответствует искровой стадии разряда, для которой характерно быстрое снижение напряжения на промежутке до 25...35В и столь же быстрое увеличение тока в цепи. Участок 2…3 соответствует дуговой стадии разряда, на которой незначительно снижаются напряжение и ток в цепи. При падении напряжения U_S ниже 15...20В разряд прекращается. При обработке короткими импульсами высокой частоты дуговая стадия разряда может отсутствовать, и разряд прекращается сразу после искровой стадии. Количество удаленного материала на дуговой стадии разряда и размеры образующихся лунок значительно больше, чем на искровой стадии.

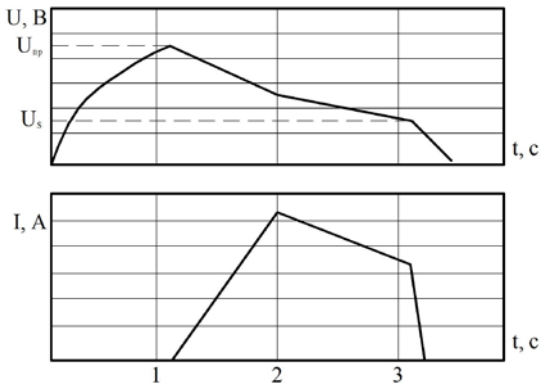

Рис. 2- Временные диаграммы изменения напряжения и тока в электродном промежутке

Основные технологические показатели процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) - точность, качество поверхности, производительность -

зависят от количества выплавляемого за один импульс металла из ванн, что определяется энергией импульса.

Энергию импульса находим из выражения:

$$A_и = I_{ср} U_{ср} \tau_и \text{ [Дж]}, \quad (1)$$

где $I_{ср} = (0{,}5...0{,}75) I_к$ - средняя сила тока, А;

$I_к$ - значение силы тока при коротком замыкании (устанавливается по приборам станка);

$U_{ср} = (0{,}5...0{,}75) U_0$ - среднее напряжение пробоя, В;

U_0 - напряжение холостого хода при разомкнутых электродах (контролируется в процессе обработки);

$\tau_и$ - длительность импульсов (обратно пропорциональна частоте их следования), С.

В зависимости от технологических условий энергию импульса можно оценить по рекомендациям таблицы 1.

Таблица 1-Величины энергии импульса

Режим ЭЭО	U_0, В	$I_к$, А		$\tau_и$, мкс	
		Черновая обработка	Чистовая обработка	Черновая обработка	Чистовая обработка
Электроискровой	40...180	20...600	0,5. ..50	200...10^5	5...200
Электроимпульсный	18...36				
Электроконтактиая обработка в жидкости	18...40				
Электроконтактиая обработка на воздухе	3...12				

Исходя из теории теплопередачи температуру в точке воздействия импульса определяют из выражения:

$$T = \frac{T_0 + \theta \eta_и A_и}{(c \rho r^3)} \text{ [°K]}, \quad (2)$$

где T_0 - начальная температура электрода, °К;

$\eta_и$ - коэффициент полезного использования энергии импульса;

θ - безразмерный параметр температуры, учитывающий термодинамические свойства электродов (теплопроводность, теплоёмкость, плотность, условия обработки);

c - удельная теплоёмкость обрабатываемого электрода, Дж/(кг·°К);

ρ - плотность обрабатываемого электрода, кг/м;

r - радиусы полусфер изотерм, характеризующих распределения температур от точки воздействия импульса энергии, м.

Из формулы 2 определяем радиус полусферы выплавляемого металла

$$r = \sqrt[3]{\frac{\theta \eta_и A_и}{(T - T_0) c \rho}}. \quad (3)$$

Отсюда объем металла (в виде полусферы), удаляемого одним импульсом, находим из выражения

$$\alpha_{им} = \frac{0{,}5236}{2} D^3, \quad (4)$$

где объем сферы $0{,}5236D^3$, а $D = 2r$.

На практике число импульсов, выработанных генератором, и число импульсов, реализуемых в межэлектродном зазоре, отличаются из-за реальных условий протекания процесса, что учитывается коэффициентом Ψ:

$$\psi = \frac{f}{f_{г.и}}, \quad (5)$$

где f - частота импульсов, вызывающих эрозию, Гц;

$f_{г.и}$ - частота импульсов, вырабатываемых генератором. Реальное количество металла, удаляемого импульсом, будет

$$K = \Psi \alpha_{им} \quad (6)$$

Производительность процесса ЭЭО находим из выражения

$$Q = \frac{K \cdot a_{им}}{q \cdot \tau_{им}}, \quad (7)$$

где q - скважность, отношение периода повторения импульсов к их длительности.

Время действия импульса, скважность и частота импульсов связаны зависимостью

$$\tau_и = \frac{1}{(qf)} \text{ [с]}. \quad (8)$$

Скорость перемещения электрода-инструмента определяем из выражения

$$V_{ин} = \frac{Q}{S}, \quad (9)$$

где S - площадь обрабатываемой поверхности.

Основное время ЭЭО определяем по формуле

$$t_0 = \frac{h}{v_{ин}}, \quad (10)$$

где h - перемещение электрода-инструмента для снятия необходимого припуска.

Ожидаемую после ЭЭО шероховатость поверхности оцениваем по формуле

$$Rz = k_н A_и^p \text{ [мкм]}, \quad (11)$$

где $k_н$ - коэффициент условий обработки (для черновых режимов $k_н$ = 10...50, а для чистовых режимов $k_н$ =2...10);

p - показатель степени, характеризующий форму лунки, образованной от воздействия импульса (p = 0,3...0,04).

На точность изготовления деталей после ЭЭО влияют: точность изготовления электрода-инструмента; износ инструмента; погрешность формы и размеров заготовки и т.д. На современном уровне ЭЭО точность достигнет 6...7 квалитета.

Определение режимов и основных технологических показателей ЭЭО

Пример. Определить режимы и основные технологические показатели ЭЭО глухого паза 50×10×10, выполненной по 7-му квалитету, Ra = 1,6 мкм, в закаленной стальной высокоуглеродистой пластине в условиях серийного производства. ЭЭО предусматривает принудительную прописку рабочей жидкости и использование широкодиапазонного генератора импульсов.

Решение. Указанны условия по точности и шероховатости поверхности могут быть выполнены при электроискровом режиме обработки с прямой полярностью включения электродов, со временем импульса $\tau_и$ = 5...200 мкс, при частоте f = (50...2)10^3Гц. В качестве диэлектрической жидкости можно использовать пиронафт (керосин осветлённый тяжелый). Но при подобном режиме производительность обработки будет незначительна. В условиях серийного производства наиболее целесообразно применение комбинированной обработки, а именно: предварительную обработку, черновую, произвести в более производительном электроимпульсном режиме, а окончательную чистовую обработку - электроискровом режиме.

Для обеспечения комбинированной обработки необходимо изготовление двух видов инструментов-электродов: из металлографита по 10-му квалитету точности при Ra = 6,3 мкм и из меди по 6-му квалитету точности с Ra = 0,8 мкм, соответственно для черновой и чистовой обработок.

В конструкциях инструментов необходимо предусмотреть отверстия для прокачки рабочей жидкости. Схемы черновой и чистовой обработок изображены на рис. 3.

Примем межоперационный припуск z = 1 мм.

а). Определим режимы и основные технологические показатели черновой ЭЭО.

В качестве рабочей жидкости принимаем масло индустриальное 20 (кинематическая вязкость 10^{-4} м^2/с — при 30 °С, температура вспышки

170°). Согласно таблице 1.1 примем $I_{ср}$ = 500А; $U_{ср}$ = 30 В; f = 10^3 Гц; q = 1.

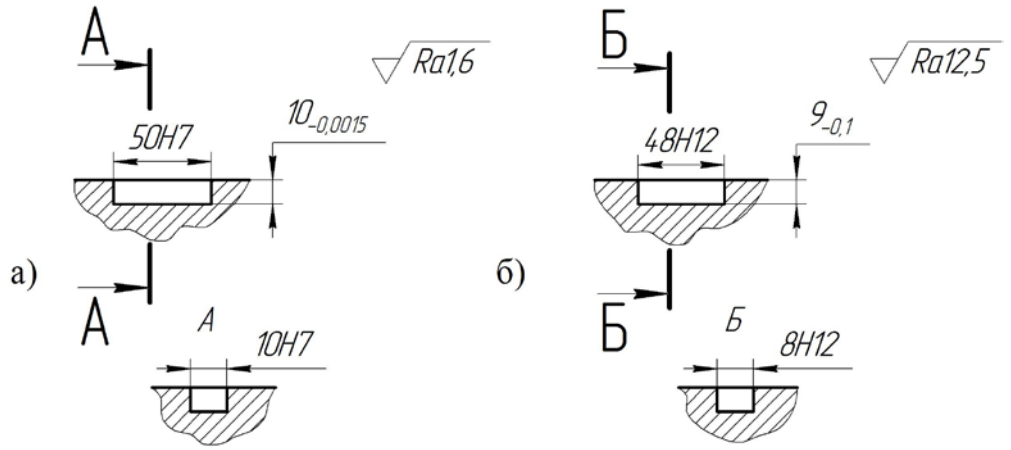

Рис. 3-Схемы обработок: а) чистовая, б) черновая

По формуле 1.1 определяем энергию импульса:

$$A_и = I_{ср} U_{ср} \tau_и = 30 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ Дж},$$

где $\tau_и = \dfrac{1}{(qf)} = \dfrac{1}{1 \cdot 10^3} = 10^{-3}$ с.

Находим радиус полусферы металла, выплавляемого одним импульсом, по формуле 1.3:

$$r = \sqrt[3]{\frac{\theta \eta_и A_и}{(T - T_0) c \rho}} = \sqrt[3]{\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}85 \cdot 15}{(1800 - 300) \cdot 0{,}426^3 \cdot 7{,}9 \cdot 10^{-3}}} = 0{,}84 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0{,}084 \text{ мм},$$

где - температура плавления стали T = 1800 °К(T = 273,15 + t °С);

- начальная температура заготовки T_0 = 300 °К;
- безразмерный температурный параметр $\theta = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$;
- коэффициент полезного использования энергии импульса $\eta_и = 0{,}85$;
- удельная теплоёмкость заготовки $c = 0{,}426 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К);
- плотность заготовки $\rho = 7{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Находим объём металла, удаляемого одним импульсом, по формуле 4:

($D = 2r = 2 \cdot 0{,}084 = 0{,}168$ мм).

$$\alpha_{им} = \frac{0{,}5236}{2} D^3 = \frac{0{,}5236}{2} \cdot 0{,}168^3 = 2{,}43 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3.$$

Производительность ЭЭО определяем по формуле 7, принимая $\psi = 1$,

$$Q = \frac{k A_и}{q \tau_и} = 2{,}43 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3 = 3{,}6 \text{ мм}^3/\text{с} = 216 \text{ мм}^3/\text{мин}.$$

Определим скорость перемещения электрода-инструмента по формуле 9 с учётом припусков под чистовую обработку:

$$V_{ин} = \frac{Q}{S} = \frac{216}{384} = 0{,}562 \text{ мм/мин};$$

где $S = 48 \cdot 8 = 384$ мм^2.

Определим основное время черновой обработки по формуле 10:

$$t_0 = \frac{h}{\vartheta_{ин}} = \frac{9}{0{,}562} = 16{,}01 \text{ мин.}$$

Определим ожидаемую шероховатость поверхности после черновой обработки по формуле 1.11, принимая p = 1/3 и $k_н$ = 20:

$$Rz = k_н A_и^p = 20\sqrt[3]{15} = 20 \cdot 2{,}47 = 49{,}4 \text{ мкм,}$$

$$Ra \approx \frac{Rz}{4} \approx \frac{49{,}4}{4} \approx 12{,}3 \text{ мкм.}$$

б). Определим режимы и основные технологические показатели чистовой ЭЭО.

В качестве рабочей жидкости принимаем пиронафт. Режимы работы - электроискровой, прямой.

Определим энергию импульса, обеспечивающего требуемое качество обработки поверхностей (Ra = 1,6 мкм или $Rz \approx 4 \cdot 1{,}6 = 6{,}4$ мкм). Из формулы 11 находим $A_и^p = \frac{A_z}{k_н}$, принимая p = 1/3 и $k_н$ = 10, что соответствует чистовой обработке, получим

$$A_{и.т} = \sqrt[3]{\frac{Rz}{k_н}} = \sqrt[3]{\frac{6{,}4}{10}} = 0{,}86 \text{ Дж.}$$

Ориентируясь на полученное значение $A_{и.т}$, по рекомендациям, представленным в таблице 1, примем следующие электродинамические параметры: $I_{ср}$ = 50 А; $U_{ср}$ = 150 В; $\tau_и = 100 \cdot 10^{-6}$ с; q = 2.

Отсюда находим реальное значение энергии импульса для чистовой обработки, по формуле 1:

$$A_и = I_{ср} U_{ср} \tau_и = 150 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0{,}75 \text{ Дж.}$$

Меньшее значение энергии импульса, по сравнению с требуемым значением, гарантирует получение необходимого качества поверхности обработки и незначительно уменьшит производительность процесса, поэтому в дальнейших расчётах будем ориентироваться на выбранные электродинамические параметры.

Находим радиус полусферы в заготовке, выплавляемой под воздействием одного импульса, по формуле 3:

($T - T_0 = 1500$ К; $\theta = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$; $\eta_и = 0{,}8$; $c = 0{,}426 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\rho = 7{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3)

$$r = \sqrt[3]{\frac{\theta \eta_и A_и}{(T - T_0) c \rho}} = \sqrt[3]{\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}75}{1500 \cdot 0{,}426 \cdot 10^3 \cdot 7{,}9 \cdot 10^3}} = 0{,}301 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0{,}03 \text{ мм}$$

($D = 0{,}06$ мм).

Находим объём металла, удаляемого одним импульсом, по формуле 4:

$$\alpha_{им} = \frac{0{,}5236}{2} D^3 = \frac{0{,}5236}{2} \cdot 0{,}06^3 = 56{,}548 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Определяем объём металла, удаляемого суммарной энергией импульса, в 1 Дж (чтобы использовать выражение 7, необходимо затратить энергию не менее 1 Дж).

$$\alpha_{им(1Дж)} = \frac{1}{0{,}75} \alpha_{им} = \frac{1}{0{,}75} \cdot 56{,}548 \cdot 10^{-6} = 75{,}39 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Определяем производительность чистового процесса ЭЭО по формуле 7 ($\psi = 1$).

$$Q = \frac{\alpha_{им(1Дж)}}{q \tau_i} = \frac{75{,}39 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 0{,}3769 \text{ мм}^3\text{/с} = 22{,}617 \text{ мм}^3\text{/мин}.$$

Скорость перемещения электрода-инструмента, с учётом припусков под чистовую обработку, (рис. 1 в зависимости от площади обработки) распределится по двум уровням, формула 9:

$$V_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{22{,}617}{116} = 0{,}1949 \text{ мм/мин; } (S_1 = 2(50 \cdot 1) + 2(8 \cdot 1) = 116 \text{ мм}^2);$$

$$V_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{22{,}617}{500} = 0{,}0452 \text{ мм/мин; } (S_2 = 50 \cdot 10 = 500 \text{ мм}^2).$$

Определяем основное время по двум уровням скорости (формула 10):

$$t_{0;1} = \frac{h_1}{v_1} = \frac{9}{0{,}1949} = 46{,}17 \text{ мин}.$$

$$t_{0;2} = \frac{h_2}{v_2} = \frac{1}{0{,}045} = 22{,}12 \text{ мин}.$$

Находим основное время чистовой обработки

$$t_0 = t_{0;1} + t_{0;2} = 46{,}17 + 22{,}12 = 68{,}29 \text{ мин}.$$

Таким образом, согласно условиям задачи, определены следующие параметры ЭЭО:

для черновой обработки: электроимпульсный режим, масло индустриальное 20;

$I_{ср}$ = 500 А; $U_{ср}$ = 30 В; $f = 10^3$ Гц; q = 1; $A_и = 15$ Дж; $\tau_и = 10^{-3}$ с;

$V_{ин} = 0{,}562$ мм/мин; $t_0 = 16{,}01$ мин; $Q = 216$ мм^3/мин; $Ra = 12{,}3$ мкм;

для чистовой обработки: электроискровой режим, прямой; диэлектрическая жидкость - пиронафт;

$I_{ср}$ = 50 А; $U_{ср}$ = 150 В; $\tau_и = 100 \cdot 10^{-6}$ с; q = 2; $A_и = 0{,}75$ Дж;

$Ra \le 1{,}6$ мкм; $v_1 = 0{,}19$ мм/мин; $v_2 = 0{,}045$ мм/мин; $t_0 = 68{,}29$ мин.

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.