

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 2025

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 сьема 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.

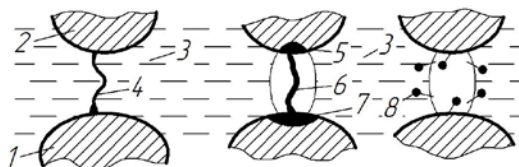


Рис 1- Схема электроэрозионной обработки

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.

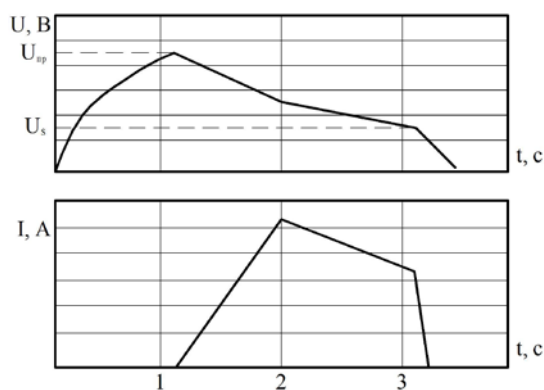


Рис. 2- Временные диаграммы изменения напряжения и тока в электродном промежутке

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:

$$A_u = I_{cp} U_{cp} \tau_u \text{ [Дж]}, \quad (1)$$

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

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

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

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

τ_u - 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_k , А		τ_u , 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				
Электроконтактная обработка в жидкости	18...40				
Электроконтактная обработка на воздухе	3...12				

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

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

где T_0 - начальная температура электрода, °K;

η_u - 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·°K);

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 выплавленного металла

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

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

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

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

$$K = \Psi \alpha_{um} \quad (6)$$

Производительность процесса ЭЭО находим из выражения

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

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

Время действия импульса, скважность и частота импульсов связаны зависимостью

$$\tau_u = \frac{1}{(qf)} [c]. \quad (8)$$

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

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

где k_n - коэффициент условий обработки (для черновых режимов $k_n = 10 \dots 50$, а для чистовых режимов $k_n = 2 \dots 10$);

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

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 качества.

Определение режимов и основных технологических показателей ЭЭО

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

Решение. Указанные условия по точности и шероховатости поверхности могут быть выполнены при электроискровом режиме обработки с прямой полярностью включения электродов, со временем импульса $\tau_u = 5 \dots 200$ мкс, при частоте $f = (50 \dots 2) 10^3$ Гц. 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 качеству точности при $Ra = 6,3$ мкм и из меди по 6-му качеству 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} м²/с — при 30 °С, температура вспышки

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

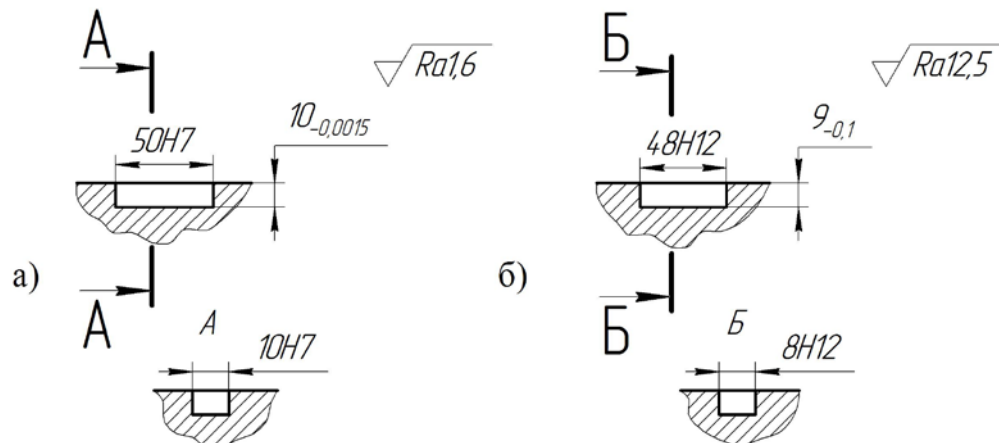


Рис. 3-Схемы обработок: а) чистовая, б) черновая

По формуле 1.1 определяем энергию импульса:

$$A_u = I_{cp} U_{cp} \tau_u = 30 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ Дж},$$

где $\tau_u = \frac{1}{(qf)} = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 10^{-3} \text{ с}.$

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

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

- где
- температура плавления стали $T = 1800\text{ °К}$ ($T = 273,15 + t\text{ °С}$);
 - начальная температура заготовки $T_0 = 300\text{ °К}$;
 - безразмерный температурный параметр $\theta = 2,3 \cdot 10^{-4}$;
 - коэффициент полезного использования энергии импульса $\eta_u = 0,85$;
 - удельная теплоёмкость заготовки $c = 0,426 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}$;
 - плотность заготовки $\rho = 7,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

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

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

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

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

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

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 $S = 48 \cdot 8 = 384 \text{ мм}^2$.

Определим основное время черновой обработки по формуле 10:

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

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

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

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

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 $A_u^p = \frac{A_z}{k_n}$, принимая $p = 1/3$ и $k_n = 10$, что

соответствует чистовой обработке, получим

$$A_{u.m} = \sqrt[3]{\frac{Rz}{k_n}} = \sqrt[3]{\frac{6,4}{10}} = 0,86 \text{ Дж.}$$

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

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

$$A_u = I_{cp} U_{cp} \tau_u = 150 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,75 \text{ Дж.}$$

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:

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

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

$$(D = 0,06 \text{ мм}).$$

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;

$$I_{cp} = 500 \text{ А}; U_{cp} = 30 \text{ В}; f = 10^3 \text{ Гц}; q = 1; A_u = 15 \text{ Дж}; \tau_u = 10^{-3} \text{ с};$$

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

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

$$I_{cp} = 50 \text{ А}; U_{cp} = 150 \text{ В}; \tau_u = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}; q = 2; A_u = 0,75 \text{ Дж};$$

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

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.