

В.Н. Халдеев

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ

*Научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Проспект Мира д.37, г. Саров, 607190, Нижегородская область*

Технологические показатели процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) определяются в основном энергетическими параметрами единичного электрического импульса: его энергией $W_{и}$ и длительностью $t_{и}$. Энергия импульса определяет при этом количество металла, удаляемого с поверхности обрабатываемой заготовки (а также и инструмента); длительность же импульса определяет процесс развития разряда, выброс расплавленного или испаренного металла из лунки, а также распространение тепла вглубь электродов.

Количество удаленного за импульс металла определяет производительность обработки и величину шероховатости обработанной поверхности. Последняя устанавливается не только объемом, но и формой эрозионной лунки, представляющей собой подобие сферического сегмента относительно большого диаметра и малой глубины. Соотношение глубины и диаметра лунки не является постоянным для всех режимов обработки, а зависит от величин энергии и длительности импульса. Чем меньше длительность импульса при неизменных величинах его тока и напряжения, тем больше это соотношение. Увеличение же длительности импульса, которое вызывает возрастание площади сечения канала разряда, увеличивает диаметр лунки, понижая тем самым соотношение величин глубины и ее диаметра. Наибольший эффект эрозии, то есть наибольшее количество металла, удаляемого с поверхности заготовки за один импульс, достигается при вполне определенном соотношении между энергией и длительностью импульса.

При назначении электрических параметров режима ЭЭО величину энергии импульса обычно задают исходя из требуемой величины шероховатости обработанной поверхности и заданной точности обработки. Длительность импульса может быть выбрана исходя из допустимой величины измененного поверхностного слоя.

Вполне очевидно, что достижение стабильного протекания процесса и получение высоких технологических показателей ЭЭО неизбежно требует вполне определенного соответствия между энергией и длительностью импульса. В реальных условиях обработки это соответствие весьма приближенное и достигается обычно эмпирическим путем с применением соответствующих таблиц или номограмм [1, 2]. Однако методика назначения электрических параметров режима с применением таблиц или номограмм не является совершенной, поскольку никакая таблица не сможет, естественно, охватить все многообразие ситуаций обработки. В связи с этим целесообразно попытаться получить аналитическую зависимость между энергией и длительностью импульса, применимую ко всем случаям обработки.

Зависимость между энергией $W_{и}$ и длительностью $t_{и}$ электрического импульса приведена в работах [3, 4], однако даже в лучшей из этих работ [3] в зависимость $W_{и} = f(t_{и})$ входят эмпирические коэффициенты, значения которых определяются зачастую результатами эксперимента и к тому же являются неоднозначными в зависимости от условий его проведения. Поэтому зависимости $W_{и} = f(t_{и})$, приводимые в этих и других работах, не являются универсальными и имеют ограниченное применение.

Прежде чем предпринимать попытку установления приемлемой аналитической зависимости $W_{и} = f(t_{и})$, необходимо выявить ее физическую сущность. Как известно из многочисленных опытных

данных, большей величине энергии импульса, оцениваемой в основном величиной тока в импульсе, поскольку во время действия импульса напряжение между электродами остается практически постоянным и равным приблизительно 20 В, должна соответствовать также большая длительность импульса. В противном случае мощность электрического импульса не сможет быть реализована с достаточно высоким коэффициентом полезного действия.

Физически сила тока в импульсе представляет собой вполне определенное количество электронов (в расчет принимается только электронный компонент энергии электрического разряда), проходящее через сечение канала разряда к поверхности анода. Наибольшая эффективность действия электрического разряда достигается в том случае, когда все электроны передают свою энергию поверхности анода, на которой они тормозятся. При этом вполне допустимо предположение, что электроны на анод поступают порциями, а не непрерывно и хаотически. В основе такого предположения лежит характер кулоновского взаимодействия для одноименно заряженных частиц. При порционном поступлении электронов на поверхность анода одна или несколько первых порций электронов тормозятся на каком-то участке поверхности анода, находящемся в зоне воздействия канала разряда, и, передавая ему свою энергию, нагревают его, предположим, до температур, меньших температуры плавления. Последующие порции электронов доводят поверхностные слои этого участка до температуры плавления. Третья группа порций электронов, ударяясь о поверхность расплавленного металла, разбрызгивает его, выбрасывая за пределы теплового пятна. Четвертая группа порций электронов доводит до температуры плавления следующий (нижележащий) слой металла; пятая – вновь удаляет расплавленный металл из образовавшейся лунки и так далее до тех пор, пока не прекратится поток электронов, поступающих на анод во все время действия импульса. При этом во время действия импульса ток течет непрерывно, являясь в то же время дискретным. Описанная динамика поступления электронов на анод характерна лишь для того случая, когда между величинами энергии и длительности электрического импульса имеется идентичное соответствие.

Если энергия импульса, оцениваемая количеством электронов в порции, превышает оптимальное значение его длительности, то количество расплавленного предыдущей порцией электронов металла не будет успевать полностью отводиться последующей их порцией. При этом не удаленная часть расплавленного металла, получив дополнительно энергию от поступивших электронов, будет нагреваться до температур, превышающих не только температуру плавления, но и температуру кипения данного металла. При таких температурах некоторая часть расплавленного металла переходит в парообразное состояние и удаляется из зоны обработки в виде паровых струй, унося с собой некоторое количество энергии и охлаждая тем самым оставшийся в эрозионной лунке металл. Последующие порции электронов должны довести до температуры плавления нижележащие слои металла, однако на это уже может не хватить времени протекания импульса, поскольку его длительность, как было оговорено ранее, меньше оптимальной.

Если же, наоборот, длительность импульса превышает его оптимальное значение, то и количество электронов в каждой порции будет соответственно меньше оптимального. Поэтому процесс эрозии может не начаться совсем, или же величина эрозии будет чрезвычайно малой.

Итак, основываясь на вышеизложенной физической сущности, переходим к выводу аналитической зависимости между энергией и длительностью электрического импульса, для чего прежде всего определим количество электронов, поступающих на анод за время, равное длительности импульса.

Концентрация носителей тока (электронов и положительно заряженных ионов) в плазме канала разряда велика и оценивается величиной порядка $10^{13} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [3, 5, 6], что обуславливает высокую электропроводность канала разряда (его сопротивление не превышает 0,1 Ом [3, 7, 8]). Подвижность электронов в плазме в случае ЭЭО приблизительно равна $6 \cdot 10^5 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что на три порядка выше подвижности ионов, поэтому ток в плазме канала разряда (особенно в прианодной его области) создается в основном электронами [9].

Допуская, что носителями тока в прианодной области являются электроны, их количество, поступающее в единицу времени на анод, может быть определено площадью сечения канала разряда и минимальной величиной расстояния между ближайшими электронами в плазме канала разряда. Согласно [10], плотность тока в процессе электрического разряда при ЭЭО достигает 10^8 А/см^2 , что в пересчете на концентрацию электронов дает величину порядка $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Объем канала разряда, являющийся функцией времени, прошедшему с начала действия импульса, величины напряжения между электродами в данный момент времени, диэлектрических свойств рабочей жидкости, может меняться в достаточно широких пределах. Так, согласно экспериментальным исследованиям автора и в соответствии с [4], величина МЭП в процессе ЭЭО в зависимости от условий его проведения находится в пределах 10 – 150 мкм. Радиус канала разряда колеб-

лется в пределах от долей (0,1 – 0,2) мкм (в зависимости от длительности импульса) в начальный момент действия импульса до десятков и даже сотен микрометров к концу его действия. Тогда приближенное численное значение объема канала разряда будет находиться в пределах $5 \cdot 10^{-12} - 10^{-5} \text{ см}^3$. В таком объеме плазмы канала разряда в каждый момент времени должно находиться соответственно $10^4 - 2 \cdot 10^{10}$ электронов. При этом отвод электронов из зоны канала разряда в анод постоянно компенсируется поступлением их в канал с катода.

Радиус электрона $r_e = 2,81758 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ [11]. При нулевом расстоянии между электронами, то есть при касании их друг друга, сила только лишь кулоновского взаимодействия между ними, отталкивающая их друг от друга, равна 7,34 Н. Для электрона с его чрезвычайно малой массой это усилие весьма большое, поэтому в плазме канала разряда едва ли смогут находиться электроны, непосредственно касающиеся друг друга. С теоретической точки зрения электроны должны находиться на таком расстоянии друг от друга, когда силы электростатического отталкивания будут уравновешены силами гравитационного притяжения. Однако согласно произведенному расчету сила гравитационного притяжения для электронов может быть ощутимой лишь при очень малых расстояниях между ними.

Напряженность электрического поля, создаваемая каждым из электронов, находящимся в плазме канала разряда, равна [9]:

$$E_e = \frac{e}{r^2}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; r – расстояние между центрами соседних электронов.

Напряженность же поля в МЭП, создаваемая внешним источником, то есть генератором импульсов, равна [3]:

$$E = \frac{U}{l}, \quad (2)$$

где U – величина напряжения между электродами; l – величина МЭП.

Учитывая, что напряженность внешнего электрического поля многократно больше напряженности поля, создаваемого соседними электронами, следует полагать, что расстояние между электронами в направлении внешнего поля не будет равным расстоянию между ними в направлении, перпендикулярном ему. Полагая, что определяющее влияние на величину расстояния между электронами в направлении действия электрического поля оказывает именно это внешнее поле, приравнявая выражения (1) и (2), получим

$$r = \sqrt{\frac{el}{U}}. \quad (3)$$

Как следует из этого выражения, с увеличением напряжения между электродами расстояние между соседними в направлении поля электронами уменьшается.

Расстояние r_d между электронами в перпендикулярном к оси канала направлении определяется из следующей формулы [12]:

$$n \frac{4\pi}{3} r_d^3 = 1, \quad (4)$$

где n – концентрация электронов в плазме канала разряда.

Концентрация электронов в плазме канала разряда, как отмечено выше [3, 5, 6], составляет $10^{13} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из экспериментальных данных, приведенных в [10], определено, что $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Подставив это значение в уравнение (4), находим расстояние r_d :

$$r_d = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (5)$$

Зная величины расстояний r и r_d между электронами, можно получить выражение для определения количества электронов в объеме канала разряда. Для этого определим вначале количество слоев, находящихся в каждый данный момент времени в канале разряда:

$$n_{\text{сл}} \frac{l}{r} = \sqrt{\frac{Ul}{e}}, \quad (6)$$

то есть с увеличением напряжения между электродами количество слоев возрастает. Количество электронов в слое может быть определено следующим образом:

$$n_{\text{Еслое}} = \frac{S_{\kappa}}{S_{\text{д}}} = \frac{\pi R_{\kappa}^2}{\pi r_{\text{д}}^2} = \left(\frac{R_{\kappa}}{r_{\text{д}}} \right)^2. \quad (7)$$

Тогда количество электронов в объеме канала разряда

$$n_{\text{е}} = n_{\text{сл}} \cdot n_{\text{Еслое}} = \sqrt{\frac{Ul}{e}} \left(\frac{R_{\kappa}}{r_{\text{д}}} \right)^2. \quad (8)$$

Кинематические параметры электрона, движущегося в плазме канала разряда под воздействием приложенного к электродам напряжения, определим исходя из следующих зависимостей. Так, скорость электрона, движущегося под действием электрического поля в плазме канала разряда в момент времени t с начала движения, определяется следующей формулой [9]:

$$V = at = \frac{eU}{ml} t, \quad (9)$$

где a – ускорение движения электрона; m – масса электрона.

Минимальное время t_{min} прохождения электроном расстояния от катода до анода в предположении, что столкновение электронов друг с другом, а также с другими частицами отсутствуют, равно [9]:

$$t_{\text{min}} = \sqrt{\frac{2l}{a}} = l \sqrt{\frac{2m}{eU}}. \quad (10)$$

Тогда скорость электрона в момент поступления его на анод

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (11)$$

Время t_{Δ} , за которое порция электронов преодолевает расстояние r , то есть интервал времени поступления порции электронов на анод, равно

$$t_{\Delta} = l \sqrt{\frac{2m}{eU}} - (l-r) \sqrt{\frac{2m}{eU}} = r \sqrt{\frac{2m}{eU}} = \sqrt{\frac{el}{U}} \cdot \sqrt{\frac{2m}{eU}} = \frac{\sqrt{2ml}}{U}. \quad (12)$$

Итак, временной интервал поступления порций электронов на анод в основном определяется величиной напряжения между электродами в данный момент времени, поскольку величина l (величина МЭП) также в основном определяется величиной приложенного напряжения.

Если за время, равное периоду поступления порций электронов на анод, процесс распространения тепла вглубь электродов успеет произойти полностью, и зона контакта электрода с каналом разряда успеет охладиться до первоначальной температуры, то и последняя порция электронов также едва ли вызовет эрозию электрода, то есть в данном случае электрод не будет подвержен электрической эрозии.

Если же интервал времени поступления очередной порции электронов на анод будет меньше времени полного отвода тепла от нагретого участка электрода, то после воздействия каждой порции электронов температура участка электрода, контактирующего с каналом разряда, будет повышаться.

Это повышение в конечном счете неизбежно приведет к электрической эрозии этого участка, причем тем быстрее, чем меньше период поступления порций электронов на анод и больше кинетическая энергия каждого из электронов. Именно этим может быть объяснен факт запаздывания выброса паров металла, а также и жидкого металла по отношению к началу действия импульса.

Практическая реализация вышеизложенного может быть представлена в виде зависимости между основными параметрами (энергией и длительностью) электрического импульса. К выводу этой зависимости подойдем следующим образом.

Максимально возможное количество электронов, поступающих за одну порцию на анод, согласно (7), равно

$$n_{\text{Еслое}} = \left(\frac{R_k}{r_d} \right)^2.$$

Согласно графической зависимости $r_k \approx r_n = f(t_n)$ [13] при $t_n = 10^{-5}$ с, $r_k \approx 60$ мкм, $n_{\text{в слое}} = 1,44 \cdot 10^6$.

Аппроксимируя вышеупомянутую графическую зависимость, можно представить ее в аналитическом виде

$$Y = 0,6203 \cdot e^{1,1793x}, \quad (13)$$

где $Y = r_n \cdot 10^5$; $x = \lg t_n$.

С учетом этой зависимости выражение (7) будет иметь вид

$$N_{\text{в слое}} = 2,5 \cdot 10^4 \cdot e^{2,3586 \lg t_n}. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что количество электронов в порции функционально зависит от длительности импульса.

Суммарная кинетическая энергия ΣW_k порции электронов, переданная аноду, равна:

$$\Sigma W_k = n_{\text{в слое}} \frac{mV}{2} = 2,5 \cdot 10^4 \cdot e_3 \cdot U \cdot e^{2,3586 \lg t_n}. \quad (15)$$

Предполагая, что вся энергия поступающих на анод электронов расходуется на увеличение теплосодержания участка его поверхности и используя уравнение теплового баланса [16], можно составить следующее выражение:

$$2,5 \cdot 10^4 \cdot e_3 \cdot U \cdot e^{2,3586 \lg t_n} = cm\Delta T, \quad (16)$$

где c – теплоемкость материала анода; m – масса металла, температура которого под воздействием порции электронов увеличилась на ΔT .

Выразим m через произведение ρ на V , где ρ – плотность материала анода, а V – его объем, равный произведению площади S канала разряда в точке контакта его с поверхностью анода и глубины h проникновения теплового потока за время, равное периоду поступления порций электронов на анод.

Поскольку площадь S канала разряда в точке контакта его с поверхностью анода является функцией времени, ее можно выразить следующим образом:

$$S = \pi r^2 = 0,1212 \cdot 10^{-10} \cdot e^{2,2386 \lg t}, \quad (17)$$

где $r \approx r_n = 0,6203 \cdot 10^{-5} \cdot e^{2,3586 \lg t}$.

Глубина h проникновения теплового потока в поверхность анода, равная глубине проникновения электронов, может быть определена из следующей эмпирической формулы [14]:

$$h = 2,1 \cdot 10^{-8} \frac{U^2}{\rho} \text{ (м)}, \quad (18)$$

где U – напряжение между электродами, кВ; ρ – плотность материала анода, кг/м³.

Тогда величина объема V материала анода, температура которого под воздействием порции электронов увеличилась на ΔT , может быть определена с помощью формулы

$$V = \pi \kappa^2 h = 0,2545 \cdot 10^{-18} \frac{U^2}{\rho} e^{2,35861gr} \quad (19)$$

Подставив выражение (19) в выражение (16) и произведя небольшие преобразования, получим

$$2,5 \cdot 10^4 \cdot e_3 = cU \cdot 0,2545 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta T,$$

откуда
$$\Delta T = \frac{e_3}{cU} \cdot 10^{23} = \frac{1,9 \cdot 10^4}{cU}. \quad (20)$$

Таким образом, каждая порция электронов приводит к нагреву участка поверхности анода, находящегося в зоне действия электрического разряда, на величину ΔT , обратно пропорциональную теплоемкости материала анода и величине напряжения между электродами.

С другой стороны, согласно [15], температура в точке приложения мгновенного источника тепла может быть определена с помощью следующего выражения:

$$T = \left(\frac{n}{8(n+2) \cdot I_n^2} \cdot \frac{E^2}{at} \right)^{\frac{1}{n+2}}, \quad (21)$$

где n – показатель степени в законе теплопроводности;

$$I_n = \int_0^1 (1-y^2)^{\frac{1}{n}} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{n+2} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{2}\right)};$$

$\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)$ и $\Gamma\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{2}\right)$ – гамма-функции; $E = \int_{-\infty}^{+\infty} T dx$ – величина энергии, передаваемая порцией электронов аноду. В данном случае величину E следует считать равной ΣW_k .

Приравняв выражения (20) и (21), получим

$$\left(\frac{n}{8(n+2) \cdot I_n^2} \cdot \frac{E^2}{at} \right)^{\frac{1}{n+2}} = \frac{1,9 \cdot 10^4}{cU} \quad (22)$$

температуропроводность материала анода; t – время вхождения электрона в анод.

Из этого соотношения получаем зависимость между энергией и длительностью единичной порции электрического импульса. То же самое соотношение будет определять зависимость между энергией и длительностью полного импульса, поскольку в этом случае правая и левая части равенства (22) должны быть умножены на одно и то же число, равное количеству порций в импульсе.

Итак, полученная зависимость между энергией и длительностью электрического импульса в условиях электроэрозионного формообразования имеет следующий вид:

$$W_n = E = \sqrt{\frac{8(n+2)}{n}} \cdot I_n \cdot \left(\frac{1,9 \cdot 10^4}{cU} \right)^{\frac{n+2}{n}} \cdot \sqrt{at_u}. \quad (23)$$

При $n = 2$, как наиболее часто встречающимся в термодинамических расчетах, уравнение (23) может быть записано следующим образом:

$$W_n = 4 I_n \left(\frac{1,9 \cdot 10^4}{cU} \right)^2 \cdot \sqrt{at_u}. \quad (24)$$

Учитывая, что при $n = \text{const}$ I_n является величиной постоянной и что величина напряжения U между электродами во время действия импульса остается практически постоянной и равной приблизительно 20 В, формулу (24) можно представить в еще более простом виде:

$$W_n = 2,834 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{at_u}}{c^2}. \quad (25)$$

Полученное уравнение (25) выражает достаточно простую зависимость между основными параметрами W_n и t_n электрического импульса, являющегося рабочим инструментом в процессе проведения электроэрозионной обработки. Как следует из этого уравнения, соответствие между энергией и длительностью электрического импульса достигается в основном через теплофизические константы материала обрабатываемой заготовки.

Расчет величины энергии W_n импульса, произведенный по уравнению (25) для ЭЭО вольфрамовой заготовки с длительностью импульса $t_n = 10^{-3}$ с, показывает, что величина энергии импульса должна быть равной $4 \cdot 10^{-2}$ Дж. В справочной литературе, например в [1, 2], величину энергии для такого значения длительности импульса рекомендуется принимать несколько большей. Однако в соответствии с основными положениями настоящей работы избыточная по сравнению с расчетной по формуле (25) доля энергии импульса расходуется нецеленаправленно, то есть не совершает работы по удалению припуска с обрабатываемой заготовки.

Итак, полученная зависимость между энергией и длительностью электрического импульса, в основу которой положено явление дискретности его воздействия на электроды, позволяет производить обоснованный выбор электрических параметров режима ЭЭО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попилов Л.Я. Справочник по электрофизическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Л., 1971.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.А. Амитан, И.А. Байсунов, Ю.М. Барон и др. / Под общ. ред. В.А. Волосатова. Л., 1988.
3. Золотых Б.Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. М., 1975.
4. Лившиц А.Л., Кравец А.Т., Рогачев И.С., Сосенко А.Б. Электроимпульсная обработка металлов. М., 1967.
5. Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы / Пер. с англ. М., 1975.
6. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М., 1978.
7. Семиохин И.А. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. М., 1988.
8. Милантьев В.П., Темко С.В. Физика плазмы. М., 1970.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2 // Электричество. М., 1973.
10. Марчук И.А., Никифоров С.В. О тепловом воздействии разряда при электроэрозионной обработке // Электронная обработка материалов. 1987. № 1. С. 8 – 13.
11. Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С. Краткий справочник по физике. М., 1964.
12. Свирский М.С. Электронная теория вещества. М., 1980.
13. Халдеев В.Н., Пашко О.В., Пашко И.В. Анализ решения уравнения теплопроводности в условиях импульсного электрического разряда // Электронная обработка материалов. 1992. № 4. С. 3 – 5.
14. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Т. 2 // Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Под. ред. В.П. Смоленцева. М., 1983.
15. Зельдович Я.Б., Компанеев А.С. К теории распространения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры / Сборник, посвященный семидесятилетию академика А.Ф. Иоффе. М., 1950. С. 61 – 71.
16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1975.

Поступила 06.05.03

Summary

The mechanism of electrical anabrosis of the anode under effect the electronics component of electric pulse surveyed. Is exhibited, that the process of arrival of electrons on the anode wears discrete character. The dependence between energy and duration of electric pulse is obtained.