



УДК 621.791.76:621.7.044.2

## УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ

**А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, И. В. ПЕНТЕГОВ**, доктора техн. наук, **Е. П. СТЕМКОВСКИЙ, Д. А. ШЕЙКОВСКИЙ,**  
**В. М. КИСЛИЦЫН, А. В. ЛАВРЕНЮК**, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен метод расчета режимов магнитно-импульсной сварки, при котором учитываются изменения индуктивности соединяемых деталей при их относительном перемещении. Показано, что его необходимо использовать в тех случаях, когда энергия, необходимая для обработки металлов, составляет значительную часть энергии, накапливаемой в батарее конденсаторов (например, для соединения деталей большого диаметра).

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная сварка, индуктивность деталей, метод расчета, оптимальные режимы сварки

В работе [1] предложен упрощенный способ расчета режимов магнитно-импульсной сварки (МИС) с комплексным использованием аналитических и численных методов расчета на ПЭВМ.

Ниже предпринята попытка разработки уточненного метода анализа процессов, происходящих при МИС цилиндрических труб с одновитковым индуктором (рис. 1), наиболее отвечающих действительным процессам. Полагается, что при разряде батареи конденсаторов на индуктор и в процессе движения метаемой детали индуктивность разрядного контура возрастает, причем движение трубы начинается с момента достижения ее материалом состояния пластичности.

Время разряда батареи конденсаторов разбивается на малые промежутки длительностью  $\Delta t$ , все параметры разрядной цепи в каждом таком  $n$ -м промежутке времени принимаются неизменными.

Значения всех необходимых параметров в конце первого промежутка  $\Delta t$  являются начальными условиями для следующего промежутка времени. Индексы параметров указывают на их значение в определенные моменты времени. Нулевой индекс указывает на значение параметра в начале первого промежутка времени, индекс 1 — в конце первого промежутка времени и начале второго и т. д.

Весь процесс разряда разбиваем на три временных интервала:

**I** — начало разряда. Давление на метаемую деталь еще не стало равно некоторому граничному значению  $P_0$ . При таком давлении еще не достигается предел текучести материала  $\sigma_T$ , метаемая деталь неподвижна, а ток на каждом промежутке определяется по формуле для колеба-

тельного процесса разряда батареи конденсаторов, причем все параметры разрядного контура неизменны в процессе интервала разряда;

**II** — продолжение процесса разряда батареи конденсаторов при давлении, большем  $P_0$ , от момента начала движения метаемой детали и до момента соударения. Ток разряда на каждом промежутке этого интервала изменяется уже по другому закону, для которого характерны прежде всего ненулевые начальные условия и изменение индуктивности метаемой трубы;

**III** — процесс разряда от момента соударения деталей и до окончания разряда батареи конденсаторов. Для тока разряда на каждом промежутке этого интервала характерно постоянство параметров разрядного контура, причем начальное значение тока и напряжения на батарее конденсаторов соответствует значению тока и напряжения

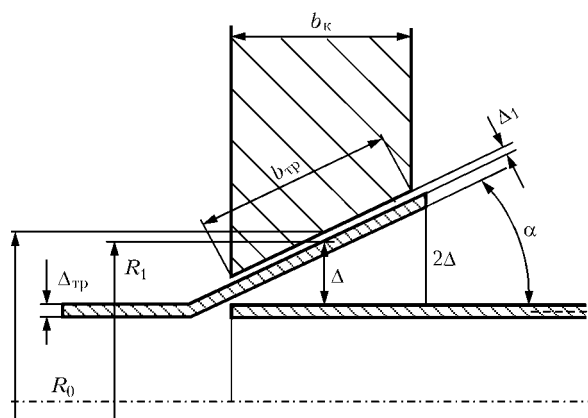


Рис. 1. Схема реализации МИС при метании деформируемого участка трубы:  $R_0, R_1$  — соответственно внутренний радиус индуктора-концентратора и наружный радиус метаемой детали по центру развальцованного участка;  $\Delta_{тр}$  — толщина стенки метаемой трубы;  $\Delta, \Delta_1$  — среднее значение зазора соответственно между соединяемыми трубами, а также индуктором-концентратором и трубой;  $\alpha$  — угол развальцовки трубы;  $b_{тр}$  — ширина нахлеста;  $b_k$  — ширина рабочего участка индуктора-концентратора



в конце второго временного участка разряда батареи конденсаторов.

Рассмотрим процессы, происходящие на I интервале, когда метаема деталь еще неподвижна. Для рассматриваемого метода расчета используем следующую зависимость [1]:

$$B(t) = \frac{\mu_0 K_R}{b_{тр}} i(t), \quad (1)$$

где  $B(t)$ ,  $i(t)$  — соответственно магнитная индукция в рабочем зазоре и разрядный ток на I интервале;  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м [2];  $K_R = 1 - \frac{\Delta_1}{\pi b_{тр}} \left(1 - e^{-\pi \frac{b_{тр}}{\Delta_1}}\right)$  — коэффициент Роговского [3].

Давление магнитного поля на метаемую деталь определяем по выражению

$$P(t) = \frac{B^2(t)}{\mu_0}. \quad (2)$$

Давление на метаемую деталь, при котором достигается предел текучести материала  $\sigma_T$  и которое зависит только от свойств материала и геометрических размеров, определяем из выражения, вытекающего из баланса сил, действующих на поверхность трубы и в ее поперечном сечении:

$$P_0 = \frac{\Delta_{тр}}{R_{тр}} \sigma, \quad (3)$$

где  $R_{тр}$  — средний радиус развальцованного участка метаемой детали в зоне сварки.

Индуктивность разрядного контура  $L_0$  состоит из постоянной за время разряда батареи конденсаторов индуктивности  $L$ , которая является индуктивностью внешнего контура, и не изменяющейся во время I интервала индуктивности системы индуктор — метаемая деталь  $L_{д0}$ :

$$L_0 = L + L_{д0},$$

где

$$L_{д0} = 2\pi \frac{\mu_0 K_R}{b_{тр}} R_{тр} \Delta_1.$$

Угловую частоту разряда находим по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{CL_0} - \frac{R^2}{4L_0^2}}. \quad (4)$$

Мгновенное значение разрядного тока на I интервале определяем по выражению [4]

$$i(t) = \frac{U_c}{\omega_0 L_0} e^{-\frac{R}{2L_0} t} \sin \omega_0 t, \quad (5)$$

где  $U_c$  — начальное напряжение на батарее конденсаторов;  $R$  — активное сопротивление разрядного контура.

По мере прохождения разрядного тока давление на метаемую деталь возрастает до тех пор, пока оно не станет равным давлению  $P_0$ , определяемому по формуле (3). Подставляя в (2) выражения (1), (5) и приравнявая  $P(t)$  к значению  $P_0$ , после преобразований получаем уравнение для нахождения  $t_0$ , времени, при котором давление на метаемую деталь достигает значения  $P_0$ :

$$\sqrt{\frac{P_0}{\mu_0}} \frac{b_{тр}}{K_R} = \frac{U_c}{\omega_0 L_0} e^{-\frac{R}{2L_0} t_0} \sin \omega_0 t_0. \quad (6)$$

Трансцендентное уравнение относительно  $t_0$  (6) решается численными методами с применением ПЭВМ.

На II временном интервале индуктивность разрядного контура  $L_n$  состоит из постоянной во время разряда батареи конденсаторов индуктивности  $L$  и индуктивности системы индуктор — метаемая деталь  $L_{дн}$ . Индуктивность  $L_{дн}$  в процессе разряда батареи конденсаторов на II интервале изменяется, изменяя условия разряда батареи конденсаторов, поэтому в индексе присутствует номер промежутка.

Для расчета параметров режима сварки на ПЭВМ находим начальные условия для II временного интервала разряда батареи конденсаторов (ток  $i_0$ , активные потери за время I временного интервала  $W_{R0}$ , давление на метаемую деталь  $p_0$ , напряжение на батарее конденсаторов  $U_0$ ):

$$i_0 = \frac{U_c}{\omega_0 L_0} e^{-\frac{R}{2L_0} t_0} \sin \omega_0 t_0, \quad (7)$$

$$W_{R0} = \int_0^{t_0} i^2(t) R dt, \quad (8)$$

$$p_0 = \frac{\mu_0 K_R^2}{b_{тр}^2} (i_0)^2, \quad (9)$$

$$U_0 = U_c - \frac{1}{C} \int_0^{t_0} i(t) dt. \quad (10)$$

Начальные условия других параметров, необходимых для расчета на II интервале, равны нулю.

На втором участке метаемая деталь начинает двигаться. Это приводит к тому, что индуктивность разрядного контура с движением детали увеличивается, изменяя условия разряда батареи конденсаторов.

При определении закономерности изменения индуктивности разрядного контура следует учесть, что она состоит из индуктивности, которая за время разряда батареи конденсаторов неизменна, и ин-

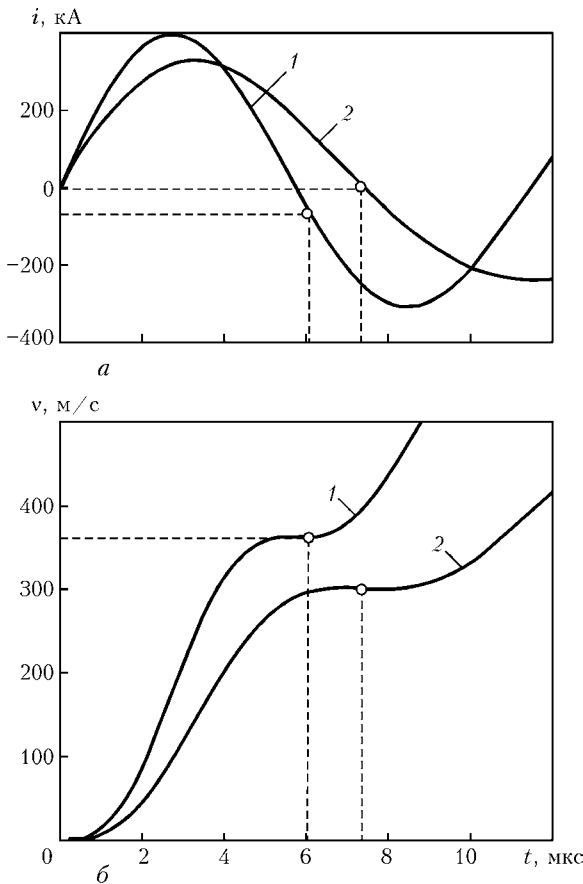


Рис. 2. Кривые разрядного тока (а) и скорости при метании деформируемого участка (б) алюминиевой трубы диаметром 80 мм: 1 — упрощенная методика работы [1]; 2 — разработанная

дуктивности, которая во время разряда возрастает. Постоянная индуктивность  $L$  обычно известна, а изменяющаяся часть индуктивности  $L_{д(n+1)}$  для  $(n + 1)$ -го промежутка  $\Delta t$  находится из выражения

$$L_{д(n+1)} = \pi \frac{\mu_0 K_R}{b_{тр}^n} [R_0^2 - (R_1 - S_n)^2], \quad (11)$$

где  $S_n$  — путь, пройденный метаемой заготовкой на  $n$ -м промежутке;  $K_R$  — коэффициент Роговского на  $n$ -м промежутке.

Значение тока на II временном интервале для  $(n + 1)$ -го промежутка времени находим по формуле, вытекающей из уравнения Кирхгофа для рассматриваемой цепи на  $n$ -м промежутке времени:

$$i_{n+1} = i_n + \frac{U_n - i_n R}{L_n} \Delta t, \quad (12)$$

где  $U_n$  — напряжение на конденсаторах на  $n$ -м интервале.

Давление на метаемую деталь на  $n + 1$ -м промежутке определяем по формуле

$$p_{n+1} = \mu_0 \frac{K_R^2}{b_{тр}^2} i_n^2. \quad (13)$$

Потери в активном сопротивлении разрядного контура машины на интервале времени  $t = (n + 1)\Delta t$  составляют

$$W_{R_{(n+1)}} = Ri_n^2 \Delta t + W_{R_n}. \quad (14)$$

Приращение скорости метаемой детали за время  $\Delta t$  на  $n$ -м промежутке определяется по формуле

$$\Delta v_n = [p_n - P_0] \frac{\Delta t}{\Delta_{тр} \gamma_{тр}}. \quad (15)$$

Скорость метаемой детали в конце  $(n + 1)$ -го промежутка

$$v_{n+1} = v_n + \Delta v_n, \quad v_0 = 0. \quad (16)$$

Путь, пройденный метаемой деталью в конце первого промежутка на II интервале

$$S_{n+1} = S_n + v_n \Delta t, \quad S_0 = 0. \quad (17)$$

Время процесса определяется согласно выражению

$$t_{n+1} = t_0 + \Delta t n. \quad (18)$$

Индуктивность разрядного контура в конце  $(i + 1)$ -го промежутка времени:

$$L_{n+1} = L + L_{дн}. \quad (19)$$

Используя выражения (11)–(19), для  $(n + 1)$ -го промежутка времени составляем систему уравнений для расчета на ПЭВМ, которая имеет вид

$$\begin{cases} i_{n+1} = i_n \frac{U_n - i_n R}{L_n} \Delta t, \\ K_{R_n} = 1 - \frac{\Delta_1 + S_n}{\pi b_{тр}} (1 - e^{-\pi \frac{b_{тр}}{\Delta_1 + S_n}}), \\ p_{n+1} = \mu_0 \frac{K_R^2}{b_{тр}^2} i_n^2 \\ W_{R_{(n+1)}} = Ri_n^2 \Delta t + W_{R_n}, \\ v_{n+1} = v_n + [\mu_0 \frac{K_R^2}{b_{тр}^2} i_n^2 - P_0] \frac{\Delta t}{\Delta_{тр} \gamma_{тр}}, \\ S_{n+1} = v_n \Delta t + S_n, \\ L_{n+1} = L + \pi \mu_0 \frac{K_R}{b_{тр}^n} [R_0^2 - (R_1 - S_n)^2], \\ U_{n+1} = U_n - i_n \frac{\Delta t}{C}, \\ t_{n+1} = t_0 + \Delta t n. \end{cases} \quad (20)$$



$P \cdot 10^{-8}$ , Па

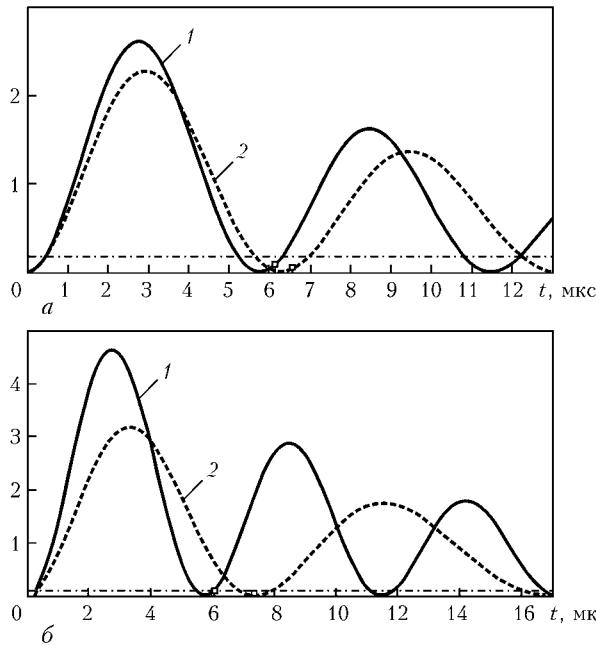


Рис. 3. Расчетное мгновенное значение магнитного давления  $P(t)$  для труб из алюминиевого сплава диаметром 20 (а) и 80 (б) мм: кривая 1 — по упрощенной методике работы [1]; 2 — по разработанной; штрихпунктирная кривая — по данной методике

II временной участок заканчивается после касания метаемой детали, проходящей путь  $S$  (среднее значение зазора между соединяемыми трубами) с неподвижной.

На рис. 2, 3 построены кривые, из которых следует, что результаты, полученные по уточненному методу, отличаются примерно на 15 % от результатов, полученных по методу без учета изменения индуктивности, что свидетельствует о том, что с увеличением диаметра труб следует пользоваться разработанной методикой.

Для определения в конкретном случае необходимого варианта метода расчета (без учета или с учетом изменения индуктивности деталей во время сварки) следует подсчитать по приведенной ниже формуле значение кинетической энергии метаемой детали  $W_k$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (21)$$

где

$$m = 2\pi R_{тр} \Delta_{тр} \gamma_{тр} b_{тр}. \quad (22)$$

Сравнение данного значения со значением всей накапливаемой в батарее конденсаторов

энергией  $W = (CU^2)/2$ , рассчитанной в результате упрощенного расчета, позволяет провести выбор варианта метода расчета. Если разность энергий не превышает 10 %, можно использовать метод расчета, описанный в работе [1], при разности более 10 % необходимо применять метод, предложенный в данной работе, учитывающий изменение индуктивности соединяемых деталей.

Следует отметить, что при использовании рассматриваемого метода для получения качественных сварных соединений время проникновения магнитного поля сквозь метаемую трубу должно быть больше времени пролета метаемой трубы.

## Выводы

1. Расчет режимов МИС с одновитковым индуктором при соединении цилиндрических труб большого диаметра необходимо проводить с учетом изменения индуктивности соединяемых деталей, что позволит обеспечивать высокую точность расчетов по сравнению с известными способами и реально отражать процессы, происходящие при сварке.

2. Определено, что чем больше кинетическая энергия, приобретаемая метаемой деталью, тем больше поправка, даваемая предлагаемым методом расчета. Если поправка менее 10 %, можно пользоваться упрощенным методом расчета, если более — уточненным.

3. Для обеспечения высокой точности предлагаемого метода расчета режимов МИС необходимо учитывать время начала движения детали, в течение которого метаемая деталь находится в неподвижном состоянии до тех пор, пока давление на нее еще не стало равно некоторому граничному значению, при котором достигается предел текучести материала деталей.

4. Разработанный метод пригоден не только для расчетов режимов МИС, но и для использования в смежных технологиях (например, при обработке металлов давлением и др.).

1. Особенности расчета режимов магнитно-импульсной сварки / А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 15–19.
2. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. — М.: Физматгиз, 1962. — 248 с.
3. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.
4. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.

The method is suggested for calculation of magnetic-pulse welding (MPW) parameters, which allows for variations in inductance of workpieces in their relative displacement. The method is indicated for the cases where the energy required for metal treatment constitutes a substantial part of the energy stored in a capacitor bank (e.g. for joining large-diameter pieces).

Поступила в редакцию 15.04.2008