верхностей электродов. Однако после прохождения подогревающего импульса тока средние значения и разброс $R_{эл}$ коррелируют между собой. При этом поверхность деталей в местах их контактирования прогревается равномерно, о чем можно судить по профилограммам, представленным на рис. 3, *б* (отсутствуют локальные сплавления контакта). Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод, что наиболее оптимальным для исследованных режимов является дискретное (500 А) повышение тока до 1 кА в течение 1 мс (режимы I, II, рис. 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.
2. Кочергин К.А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
3. Бумбиерис Э.В. Начальный контакт деталей и стабильность процесса точечной микросварки // Сварочное производство. – 1993. – № 1. – С. 27–29.
4. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
5. Соколов Н.М. Микросварка в массовом производстве радиоламп. – Саратов: Приволжское кн. изд-во, 1971. – 176 с.
6. Атауш В.Е. Управляемые источники питания для контактной сварки // Сварочное производство. – 1995. – № 6. – С. 29–30.
7. Гнюсов С.Ф., Киселев А.С., Слободян М.С. и др. Управление параметрами режима при точечной микросварке // Компьютерные технологии в соединении материалов: Тез. докл. 4-й Всерос. научно-технической конф. – Тула, 2003. – С. 111–113.
8. Гнюсов С.Ф., Киселев А.С., Слободян М.С. и др. Формирование соединения при точечной микросварке // Сварочное производство. – 2005. – № 4. – С. 37–41.

УДК 621.791.03

МОДУЛЯЦИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В.Т. Федько, О.Г. Брунов, А.В. Крюков, В.В. Седнев

Юргинский технологический институт ТПУ
E-mail: yumz@bk.ru

Рассмотрена возможность модуляции сварочной ванны в зависимости от величины ее критического объема. Получено уравнение для определения критического объема ванны от режимов сварки и пространственного положения и оптимизированы значения временных параметров модуляции.

В процессе сварки плавлением при достижении критической величины массы расплавленного металла сварочная ванна может деформироваться под действием силы тяжести, что осложняет процесс сварки в различных пространственных положениях. В этом случае при ручной дуговой сварке плавящимся электродом и механизированной сварке неплавящимся электродом применяется низкочастотная модуляция сварочного тока. Это позволяет за время импульса образовать сварочную ванну (точку) определенного объема, а за время паузы провести ее кристаллизацию. При механизированной сварке в защитной среде CO_2 применяется повторно-кратковременный режим работы, при котором металл сварочной ванны периодически кристаллизуется во время отключения подачи сварочной проволоки. Но если в первом случае время импульса и паузы задается блоком управления цикла, то при механизированной сварке плавящимся электродом в среде CO_2 эти параметры контролируются самим сварщиком [1–3]. Это может привести к снижению производительности процесса за счет увеличения времени паузы и ухудшению качества и внешнего вида сварного шва за счет возрастания времени сварки.

Исходя из вышесказанного, для сварочной ванны необходимо определить:

- критический объем;
- временные характеристики модуляции.

Известно уравнение равновесия сварочной ванны [1, 2]:

$$G(1-\cos\alpha)+P_d=P_n, \qquad (1)$$

где G – вес ванны; α – угол пространственного положения; P_d – сила давления дуги; P_n – сила поверхностного натяжения.

Из ур. (1) следует, что при достижении критического значения объема сварочной ванны произойдет вытекание расплавленного металла.

Во время периода сварки электрод не перемещается вдоль стыка, и в период паузы металл подогревается дежурной дугой, что способствует более равномерному распределению температур в месте, где будет формироваться следующая точка. В силу этого можно принять объем точки в виде суммы двух объемов сферических сегментов, рис. 1.

$$V=V_{пр}+V_{н}. \qquad (2)$$

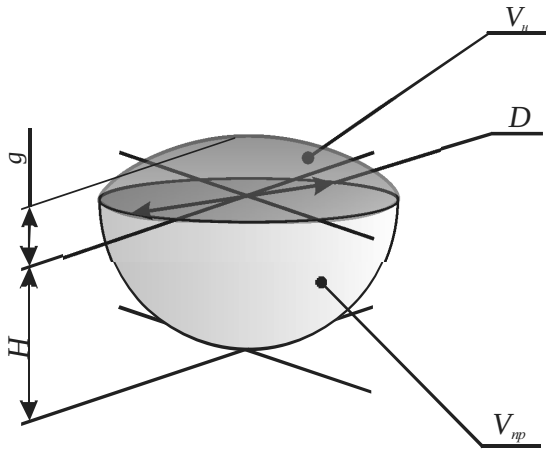

Рис. 1. *Форма сварочной ванны (H – глубина проплавления; g – усиление шва; D – диаметр ванны; $V_н$ – объем наплавленного металла; $V_{пр}$ – объем проплавленного основного металла)*

Для определения критического объема необходимо определить геометрические параметры полученной точки. С этой целью воспользуемся методикой [3]:

$$H = K_H \frac{I^a U^b}{V^c}; \quad D = K_D \frac{I^m U^n}{V^k}; \quad g = K_g \frac{I^r}{V^w U^v},$$

где I – сила сварочного тока; U – напряжение дуги; a, b, c, m, n, k, r, w, v – показатели степени (в работе [3] определены экспериментально); K_h, K_e, K_g – коэффициенты, зависящие от теплофизических свойств металла, мощности источника питания и коэффициента формы проплавления; V – скорость сварки, равная $V = \left(K_n \frac{K_D I^m U^n}{T} \right)^{k+1}$, где T – период цикла сварки; K_D=0,44 – коэффициент перекрытия точек [4].

Решая совместно ур. (1, 2), получим формулу для определения критического объема:

$$V_k = \frac{K_1 I^m U^n - P_d V^k}{K_2 V^k (1 - \cos\alpha)}, \qquad (3)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от свойств металла.

Уравнение (3) отображает функциональную зависимость объема сварочной ванны от режимов сварки и угла пространственного положения сварочной ванны.

Как видно из формулы (3), важное значение для процесса сварки имеет период T, который определяется в зависимости от временных показателей (t_u+t_n), где t_u – время сварки (импульса), t_n – время паузы.

Исходя из производственного опыта, можно записать следующие начальные параметры:

- кристаллизация ванны должна происходить на 75 %;
- во время горения дежурной дуги не должно происходить ее обрыва;
- объем точки должен превышать критический.

Определим время паузы t_n, исходя из указанных требований.

В связи с тем, что во время паузы для кристаллизации сварочной ванны необходимо ограничить сварочный ток до минимума, возникает необходимость отключить подачу сварочной проволоки. Но это приведет к обрыву дуги, что недопустимо, поэтому требуется перевести сварку с возрастающей ветви ВАХ дуги на жесткую. Тогда для стабильного горения сварочной дуги требуется внешняя крутопадающая ВАХ источника питания, рис. 2, которую можно получить путем введения в сварочную цепь балластного сопротивления.

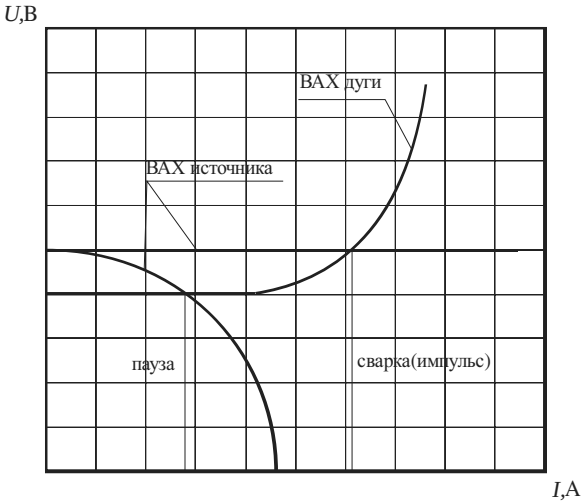

Рис. 2. *ВАХ дуги и источника питания во время сварки и во время паузы*

Определим время паузы из условия ее постоянного горения:

$$V_{пл} < \frac{\Delta l}{t_n}, \qquad (4)$$

где Δl – участок проволоки, который может расплавиться до обрыва, равный $\Delta l = l_p - l_{д(н.м.)}$, где l_p – разрывная длина дуги; $l_{д(н.м.)}$ – длина дуги в момент ее повторного зажигания.

Для определения разрывной длины дуги был проведен ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 3.

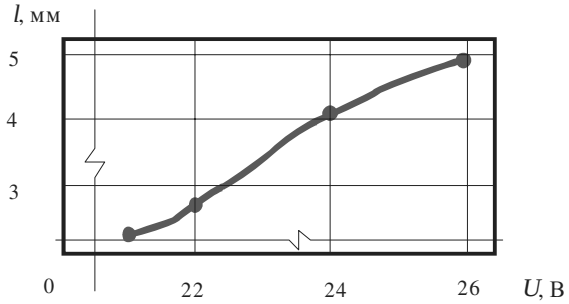

Рис. 3. *График зависимости разрывной длины дуги от напряжения дугового промежутка*

Решая совместно неравенство (4) и выражение для определения скорости плавления электродной проволоки при сварке [5]:

$$V_{пл} = 7,73 \cdot 10^{-2} \frac{IU}{d^2} + 5,12 \cdot \frac{I^2 l}{d^4},$$

получаем время паузы, которое не должно превышать:

$$t_n < \frac{\Delta l}{2,6 \cdot 10^{-5} \frac{IU}{d^2} + 4,7 \cdot 10^{-12} \frac{I^2 l}{d^4}}.$$

При силе тока 20 А, напряжении 26 В и вылете электрода 10 мм время паузы составило 0,25 с. Для определения времени импульса была рассмотрена геометрия точек, наплавленных на пластину из стали Ст.3 в вертикальном положении, рис. 4.

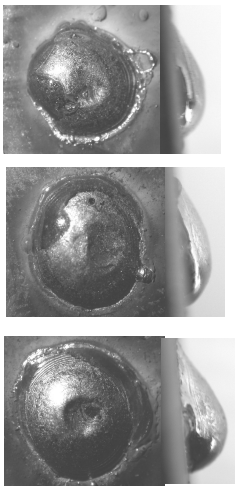

Рис. 4. *Фотографии точек, выполненных в вертикальном положении*

По полученным данным построены графики, рис. 5.

Исходя из графиков и фотографий точек, видно, что наиболее оптимальная геометрия точек представлена на рис. 4, *а* и *б*, что соответствует времени сварки 1,2 и 1,4 с соответственно, т.к. происходящее изменение геометрии точки не значительно и не влияет на процесс сварки. Форма точки, представленная на рис. 4, *в*, недопустима, т.к. происходит искажение нижней части получаемой точки.

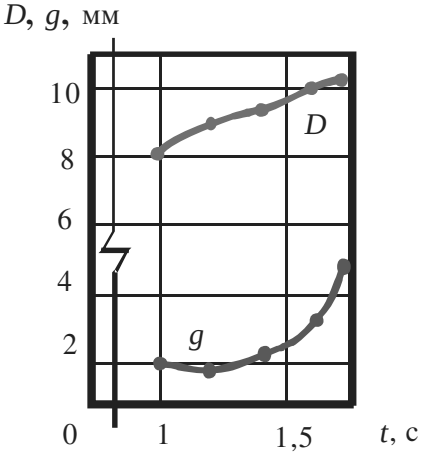

Рис. 5. *Изменение формы точек в зависимости от времени сварки*

Выводы

1. Для повышения качества сварных швов при сварке в защитной среде CO_2 тонколистового металла и при сварке в различных пространственных положениях необходимо применять сварку с низкочастотной модуляцией сварочной ванны.
2. Для исключения возможной деформации сварочной ванны время сварки не должно превышать 1,2...1,4 с.
3. Для исключения обрыва сварочной дуги при силе тока 20 А, напряжении 26 В и вылете электрода 10 мм время паузы не должно превышать 0,25 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. Особенности расчета кривизны ванны и сил поверхностного натяжения при сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 35–38.
2. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. Некоторые закономерности формирования проплава при сварке неповоротных стыков труб // Сварочное производство. – 1967. – № 4. – С. 16–180.
3. Коринец И.Ф., Цзи Чжень Чун. Детерменированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2001. – № 10. – С. 44–50.
4. Дудко Д.А., Шнайдер Б.И., Погребинский Д.М. Перекрытие точек при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 1975. – № 8. – С. 45–49.
5. Федько В.Т., Брунов О.Г., Крюков А.В., Седнев В.В. Оптимизация геометрии задающего устройства для импульсного подающего механизма с квазиволновым движением проволоки // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 132–135.