



## О ДЕМПФИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ СВАРОЧНОГО ТОКА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена возможность демпфирования нежелательных колебаний тока в сварочной цепи. Выведен критерий, позволяющий судить о демпфирующих свойствах сварочной цепи непосредственно по ее параметрам.

*Ключевые слова:* роботизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, устойчивость процесса, аperiodические режимы, демпфирование колебаний сварочного тока

Характер динамических процессов, протекающих в сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом, определяется, как известно, параметрами самой цепи. Одним из основных требований к выбору этих параметров является обеспечение устойчивой динамики для широкого класса используемых режимов. Поэтому вопросам устойчивости в свое время уделялось достаточно большое внимание. В частности, были глубоко изучены условия устойчивости для случая фиксированных параметров и получены соответствующие критерии [1–4]. Результаты последующих исследований [5–8] касались вопросов устойчивости при механизированной и автоматизированной дуговой сварке. В последнее время исследовано влияние на устойчивость параметрических возмущений, вызванных флуктуациями электрического поля в столбе дуги [9] и неконтролируемым изменением в процессе сварки контактного сопротивления в токоподводящем наконечнике горелки [10]. Изучено также влияние на устойчивость так называемых малых параметров, в частности, инерционности дугового разряда [11].

В этой связи следует заметить, что при ручной дуговой сварке условия устойчивости практически выполняются во всем диапазоне используемых сварочных токов. Это обусловлено прежде всего тем, что крутизна внешней характеристики источника сварочного тока выбирается, как правило, крутопадающей, а сварочные электроды используют достаточно большого диаметра. Такое сочетание параметров, как показано ниже, обеспечивает не только устойчивый, но и аperiodический режим, при котором переходные процессы в сварочной цепи протекают без свободных (собственных) колебаний, что благоприятно сказывается на качестве самого процесса сварки.

Несколько иначе дело обстоит при роботизированной дуговой сварке. Отличительной особенностью является то, что используют плавящуюся

электродную проволоку малого диаметра, а источники сварочного тока — с более жесткими внешними характеристиками. Именно в этом случае может произойти так называемая потеря аperiodичности и, как следствие, из-за различного рода возмущений (особенно в начале сварки) в сварочной цепи могут возникать колебательные процессы, не способствующие качественно выполнению сварки. Для демпфирования нежелательных колебаний сварочного тока нужно прежде всего располагать условиями (критериями), при выполнении которых в сварочной цепи протекают лишь аperiodические процессы.

Таким образом, появляется необходимость в установлении самого критерия аperiodичности, который можно было бы использовать при подготовке оборудования для роботизированной дуговой сварки. В настоящей работе выводится такой критерий.

Рассмотрим сварочную цепь как систему с отрицательной обратной связью по скорости плавления электрода. Благодаря этой обратной связи скорость плавления электрода, длина дуги и сварочный ток в процессе сварки автоматически поддерживаются на определенном уровне (в литературе этот эффект известен как саморегулирование дуги).

Согласно [12] в динамическом отношении рассматриваемую систему можно представить одним «свернутым» звеном с операторной передаточной функцией

$$W(D) = \frac{\Delta v_m(t)}{\Delta v_e(t)} = \frac{1}{T_e T_s D^2 + T_s D + 1}, \quad (1)$$

где  $D = d/dt$  — оператор дифференцирования;  $t$  — текущее время;  $\Delta v_m(t)$ ,  $\Delta v_e(t)$  — отклонения скорости соответственно плавления и подачи электрода от номинальных значений;  $T_e$ ,  $T_s$  — постоянные времени, определяемые соотношениями

$$T_e = \frac{L}{R_*}, \quad (2)$$



$$T_s = \frac{R_*}{EM} \quad (3)$$

Здесь  $L$  — индуктивность сварочной цепи;  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $M \equiv \partial v_m / \partial i$  — крутизна характеристики плавления электрода при номинальном значении сварочного тока  $i$ ;  $R_*$  — общее сопротивление цепи, рассчитываемое по формуле

$$R_* = R + S_a - S_s, \quad (4)$$

где  $R$  — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки;  $S_a \equiv \partial u_d / \partial i$ ,  $S_s \equiv \partial u_s / \partial i$  — крутизна вольт-амперных характеристик соответственно дуги и источника сварочного тока при номинальном значении тока  $i$ ;  $u_a$ ,  $u_s$  — напряжение на дуге и выходных клеммах источника сварочного тока соответственно.

Используя соотношение из работы [13]:

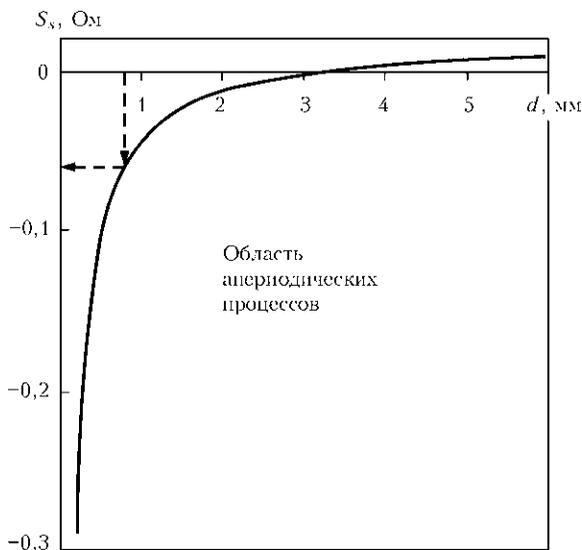
$$M = P/d^2,$$

где  $P$  — параметр, характеризующий теплофизические свойства материала электрода (плотность, температуру плавления и кипения, удельную теплоемкость и работу выхода электрона);  $d$  — диаметр плавящегося электрода, запишем выражение (3) как функцию от  $R_*$  и  $d$

$$T_s = \frac{R_* d^2}{EP}. \quad (5)$$

Располагая теперь зависимостями (2) и (5), в качестве критерия аперииодичности можно принять соотношение

$$T_s > 4T_e \quad (6)$$



Граница между областями аперииодических и колебательных процессов

при выполнении которого оба корня характеристического уравнения, соответствующего знаменателю передаточной функции (1), вещественны, различны и отрицательны [14, 15]. Следовательно, сварочная цепь в структурном отношении в этом случае представляет собой аперииодическое звено. Нарушение условия (6) переводит данное звено в колебательное. Поэтому постоянная времени  $T_s$ , определяющая инерционность сварочной цепи, является в то же время и демпфирующим фактором, поскольку с увеличением  $T_s$  происходит уменьшение собственных колебаний в сварочной цепи вплоть до полного их исчезновения.

Подставив в неравенство (6) соотношения (2), (5), получим выражение

$$R_* d > 2\sqrt{PLE}, \quad (7)$$

являющееся критерием аперииодичности процессов, которые протекают в сварочной цепи. Критерий (7) с учетом выражения (4) удобно представить в виде

$$S_s < -\frac{2\sqrt{PLE}}{d} + (R + S_a). \quad (8)$$

В правой части неравенства (8) все значения параметров, кроме  $d$ , являются постоянными и заранее известными. Следовательно, для определения области аперииодических процессов в сварочной цепи достаточно построить график зависимости  $S_s = S_s(d)$  при заданных значениях остальных параметров.

На приведенном рисунке представлена кривая  $S_s(d) = -\frac{2\sqrt{PLE}}{d} + (R + S_a)$  при  $P = 0,53 \text{ мм}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ ,  $L = 10^{-3} \text{ Гн}$ ,  $E = 2 \text{ В/мм}$ ,  $R = 0,015 \text{ Ом}$ ,  $S_a = 0,005 \text{ Ом}$ ,  $d = (0,2 \dots 6,0) \text{ мм}$ . Она является границей между областями аперииодичности и затухающих колебательных процессов. Из рисунка видно, что для электродов больших диаметров аперииодический характер практически сохраняется при любом наклоне падающей внешней характеристики источника сварочного тока. С уменьшением значения  $d$  запас аперииодичности стремительно уменьшается. Поэтому при малых значениях  $d$ , которые, как правило, используются при роботизированной дуговой сварке, для демпфирования нежелательных колебаний следует заранее рассчитать по формуле (8) подходящее значение крутизны  $S_s$  используемого источника сварочного тока. Например, если при  $d = 0,8 \text{ мм}$  и указанных значениях остальных параметров (см. рисунок) выбрать крутизну  $S_s$  больше (по абсолютной величине), чем  $|S_s| = 0,07 \text{ Ом}$ , то в сварочной цепи будут протекать только аперииодические процессы.

Итак, с помощью критерия аперииодичности (8) для любого диаметра плавящегося электрода мож-



но легко рассчитать необходимый наклон внешней характеристики источника сварочного тока, при котором сама сварочная цепь обеспечит демпфирование нежелательных колебаний при роботизированной дуговой сварке.

1. *Никитин В. П.* Электрические машины и трансформаторы для дуговой сварки. — М.; Л.: Энергоиздат, 1934. — 260 с.
2. *Патон Б. Е.* Устойчивость горения дуги в сварочной цепи, содержащей индуктивность с насыщенным стальным магнитопроводом // Автомат. сварка. — 1951. — № 2. — С. 56–63.
3. *Патон Б. Е.* Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Там же. — 1952. — № 1. — С. 38–45.
4. *Рабинович И. Я.* Некоторые вопросы теории устойчивости источников питания и систем регулирования дуговой сварки // Новые проблемы сварочной техники. — Киев: Техніка, 1964. — С. 384–397.
5. *Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Варуха Е. Н.* Повышение устойчивости дуги при сварке плавящимся электродом током прямой полярности // Свароч. пр-во. — 1981. — № 12. — С. 28–30.
6. *Судник В. А., Ерофеев В. А., Логвинов Р. В.* Исследование устойчивости процесса дуговой сварки в среде защитного газа // Изв. Тул. гос. ун-та. Сер. Компьютерные

- технологии в соединении материалов / Под ред. В. А. Судника. — Тула: Тул. гос. ун-т, 1999. — С. 110–120.
7. *Цыбулькин Г. А.* К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
  8. *Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н.* Устойчивость системы саморегулирования дуги при механизированной и автоматической сварке // Свароч. пр-во. — 2009. — № 2. — С. 13–14.
  9. *Цыбулькин Г. А.* О влиянии флуктуаций электрического поля в столбе дуги на устойчивость процесса дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2002. — № 6. — С. 44–45.
  10. *Цыбулькин Г. А.* Влияние скользящего контакта в токоподводе горелки на устойчивость процесса дуговой сварки // Там же. — 2003. — № 12. — С. 43–44.
  11. *Цыбулькин Г. А.* О влиянии малых параметров на устойчивость процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Там же. — 2008. — № 8. — С. 29–33.
  12. *Цыбулькин Г. А.* Оценка качества процесса саморегулирования дуги // Там же. — 2010. — № 2. — С. 15–18.
  13. *Коринец И. Ф.* Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке // Там же. — 1995. — № 10. — С. 39–43.
  14. *Джури Э.* Иннори и устойчивость динамических систем. — М.: Наука, 1979. — 304 с.
  15. *Поляк Б. Т., Цыпкин Я. З.* Робастная аперриодичность // Докл. АН СССР. — 1994. — 335, № 3. — С. 304–307.

Considered is the possibility of damping undesirable current fluctuations in the welding circuit. A criterion was derived, which allows assessment of damping properties of the welding circuit directly by its parameters.

Поступила в редакцию 01.02.2011

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

### ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные процессы и технологии
- материаловедение
- металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- диагностика материалов и конструкций

### АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные процессы и технологии
- материаловедение
- металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- диагностика материалов и конструкций

Прием в аспирантуру проводится в сентябре. Контактный телефон: **200-84-11**.  
 Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): **www: paton.kiev.ua**

Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю