



О ВЛИЯНИИ МАЛЫХ ПАРАМЕТРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

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

Приведены результаты аналитического и экспериментального исследования динамических процессов, протекающих в сварочной цепи, и уточнена область асимптотической устойчивости установившихся режимов дуговой сварки.

Ключевые слова: автоматическая дуговая сварка, инерционность дугового разряда, устойчивость, переходные процессы

Обеспечение устойчивости сварочного процесса по отношению к внешним воздействиям и параметрическим возмущениям является, как известно, одним из основных требований при разработке новых технологий дуговой сварки и соответствующего сварочного оборудования. Для проверки устойчивости установившихся режимов дуговой сварки обычно используется известный критерий [1–7], согласно которому эти режимы будут устойчивыми, если в рабочей точке выполняется определенное соотношение между наклонами вольт-амперных характеристик сварочной дуги и источника тока, питающего дугу.

Этот критерий был установлен в свое время в работе [3] при рассмотрении упрощенной математической модели процессов, протекающих в сварочной цепи. Однако в такой модели не учитывались так называемые малые параметры, в частности, индуктивность в цепи сварочного тока и постоянная времени дуги, характеризующая ее инерционные свойства. Ясно, что учет малых параметров в математической модели приводит к повышению порядка ее дифференциальных уравнений, но тогда возникает вопрос: насколько обосновано использование выше указанного критерия для проверки устойчивости сварочного процесса. В связи с этим появляется потребность в исследовании уточненной математической модели и выяснении дискуссионного вопроса: следует ли учитывать влияние малых параметров на устойчивость процесса дуговой сварки или этим влиянием можно пренебречь. В данной работе излагаются результаты исследований, направленных как раз на выяснение поставленных вопросов.

Математическая модель. Рассмотрим систему уравнений, описывающих, согласно [1, 4, 5, 8–13], процессы в сварочной цепи при автоматической дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа:

$$\frac{d\lambda}{dt} = M(\varepsilon + i_0) - v_e, \quad (1)$$

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} + (R - S_s)(\varepsilon + i_0) = u_* - u_a, \quad (2)$$

$$u_a = u_0 + E(\lambda + l_0) + S_a(\varepsilon + i_0), \quad (3)$$

где $\lambda = l - l_0$, $\varepsilon = i - i_0$ — отклонения текущих значений соответственно длины дуги $l = l(t)$ и сварочного тока $i = i(t)$ от значений l_0 и i_0 в установившемся режиме; $M \equiv \partial v_m / \partial i$ — крутизна характеристики плавления электрода в точке $i = i_0$; v_m — скорость плавления электрода; v_e — скорость подачи электрода относительно сопла горелки; L — индуктивность источника сварочного тока; R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки; $S_s = \partial u_s / \partial i$, $S_a = \partial u_a / \partial i$ — тангенсы углов наклона вольт-амперных характеристик соответственно источника сварочного тока и дуги в рабочей точке $i = i_0$; $E \equiv \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; u_s — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока; u_* — напряжение холостого хода; u_a — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; t — текущее время.

Система уравнений (1)–(3) представляет собой несколько уточненную математическую модель, в которой принята во внимание индуктивность источника сварочного тока, но по-прежнему не учитываются динамические свойства самой дуги. Дальнейшим уточнением этой математической модели может быть замена алгебраического уравнения (3) на дифференциальное

$$\tau \frac{du_a}{dt} + u_a = u_0 + E(\lambda + l_0) + S_a(\varepsilon + i_0), \quad (4)$$

где $\tau > 0$ — параметр, характеризующий инерционность дугового разряда.

Заметим, что используемая в (3) и (4) аппроксимация реальной зависимости $u_a = u_a(i, l)$, имеющей на самом деле распределенный характер [14], в данной задаче вполне допустима, поскольку здесь нас не интересуют так называемые мик-



ропроцессы в самой дуге, а она рассматривается с микроскопической точки зрения как элемент цепи сварочного тока, отличающийся некоторыми обобщенными инерционными свойствами.

Решив систему уравнений (1), (2) и (4) относительно переменной $\lambda(t)$ при $v_e = \text{const}$, в результате получим одно дифференциальное уравнение

$$\tau T_e T \frac{d^3 \lambda}{dt^3} + T(\tau + T_e) \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + T_s \frac{d\lambda}{dt} + \lambda = 0, \quad (5)$$

где T_e, T, T_s — постоянные времена, определяемые соотношениями:

$$T_e = \frac{L}{R_*}, \quad T = \frac{R_*}{EM}, \quad T_s = \frac{R_{**}}{EM}, \quad (6)$$

$$R_* = R - S_s, \quad R_{**} = S_a - S_s + R. \quad (7)$$

Уравнение (5), как и уравнения (1)–(3), составлены в предположении, что сварка ведется длинной дугой, расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны не изменяется и непрерывно выполняется условие $0 < l(t) < l_k$, где l_k — критическое значение длины дуги $l(t)$, при котором происходит ее обрыв. При $l(t) \geq l_k$ и $l(t) = 0$ указанные уравнения не имеют смысла, поскольку описывают процессы в сварочной цепи лишь при горении дуги.

Отсюда возникает довольно жесткое ограничение на абсолютную величину отклонения $\lambda(t)$, связанное исключительно со спецификой дуговой сварки:

$$|\lambda(t)| < \delta, \quad \delta = \min \{l_0, (l_k - l_0)\}. \quad (8)$$

Правое соотношение (8) геометрически задает полосу шириной 2δ , за пределы которой не должна выходить переменная $\lambda(t)$.

Анализ устойчивости. Из теории устойчивости известно [15–20], что переходный процесс $\lambda(t)$ при выполнении условия (8) непременно будет затухать ($\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = 0$), если коэффициенты уравнения (5) положительны, т. е.

$$\tau > 0, T > 0, T_e > 0, T_s > 0, \quad (9)$$

и выполняется неравенство

$$T_s(\tau + T_e) > \tau T_e. \quad (10)$$

Поскольку $L > 0, E > 0$ и $M > 0$, то, согласно (6) и (7), три последних неравенства (9) будут иметь место, если $R_{**} > 0$, т. е. если в силу (7) выполняется следующее условие:

$$S_a - S_s + R > 0. \quad (11)$$

Соотношение (11) представим в безразмерном виде

$$\mu + 1 > 0, \quad (12)$$

где μ — параметр, определяемый по формуле

$$\mu = \frac{S_a - S_s}{R}.$$

Неравенства (11) или (12) при выполнении условия (8) являются по сути критерием так называемой условной асимптотической устойчивости процесса дуговой сварки [19], описываемого упрощенной моделью (1)–(3).

Рассмотрим теперь неравенство (10), обусловленное учетом в математической модели инерционности дугового разряда. Непосредственная проверка этого неравенства затруднена тем, что о реальных числовых значениях постоянной времени τ , входящей в выражение (10), как правило, отсутствуют достоверные сведения. Попытаемся избежать этого следующим образом. Запишем неравенство (10) в виде

$$T_s > \frac{\tau T_e}{\tau + T_e} \quad (13)$$

и рассмотрим его правую часть. Поскольку $\tau > 0$ и $T_e > 0$, то очевидно, что

$$\frac{\tau T_e}{\tau + T_e} < T_e,$$

независимо от τ . Следовательно, условие (13), а значит и (10), будут заведомо выполняться, если

$$T_s > T_e. \quad (14)$$

Таким образом, неравенство (14) является достаточным условием асимптотической устойчивости динамических процессов, протекающих в сварочной цепи.

Запишем соотношение (14) с учетом (6), (7) в развернутом виде

$$R_* R_{**} > LEM. \quad (15)$$

Для удобства сравнения сделаем замену $R_* R_{**}$ в левой части неравенства (15) на $R_{**}^2 \approx R_* R_{**}$. Используя безразмерные величины

$$\mu = \frac{S_a - S_s}{R}, \quad \theta = \frac{\sqrt{LME}}{R}, \quad (16)$$

получаем критерий устойчивости (14) в виде

$$\mu + 1 > \theta. \quad (17)$$

Сравнив между собой формулы (12) и (17), нетрудно заметить, что они отличаются правыми



частями. Очевидно, что критерий (17) имеет существенное преимущество, поскольку позволяет более точно определить область асимптотической устойчивости, чем критерий (12). Область устойчивости, согласно (17), (16), зависит не только от наклона вольт-амперных характеристик дуги и источника сварочного тока в рабочей точке, но и от индуктивности L источника сварочного тока, крутизны характеристики плавления электрода M , напряженности электрического поля в столбе дуги E и суммарного сопротивления R подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки. Следует отметить, что критерий (17) имеет тот же вид, что и критерий, полученный нами ранее на основе неравенств Сильвестра для нестационарного случая при изучении влияния флуктуаций электрического поля в столбе дуги на устойчивость процесса дуговой сварки [21].

На рис. 1 показаны области асимптотической устойчивости, построенные на основании критериев (12) и (17) в пространстве двух параметров μ и θ . Границами устойчивости на рис. 1, а (упрощенная модель) являются линии $\theta = 0$ и $\mu = -1$. На рис. 1, б (модель с учетом малых параметров) границы устойчивости лежат на линиях $\theta = 0$ и $\mu = \theta - 1$. Как видим, в уточненной математической модели (рис. 1, б) с увеличением параметра θ область устойчивости сужается.

Из второго соотношения (16) следует, что значения θ возрастают при увеличении индуктивности L . Это означает, что при существенном увеличении L область устойчивости (рис. 1, б) может заметно сузиться. На этот факт обращалось внимание еще в работе [1], где, в частности, указывалось, что, кроме известного условия устойчивости $\mu > 0$, должно быть еще определено условие, ограничивающее индуктивность L . Теперь это условие вытекает непосредственно из выражений (17) и (16):

$$L < \frac{(S_a - S_s + R)^2}{ME}. \tag{18}$$

Впрочем, может оказаться, что значения индуктивности источника сварочного тока L выбираются исходя, например, из технологических или других соображений. В таком случае для обеспечения надежной стабильности установившихся режимов остается единственный управляемый параметр — тангенс угла наклона статической вольт-амперной характеристики источника сварочного тока S_s , при выборе которого желательно учитывать ограничение (18).

Итак, выполнение условия (17) и (8) обеспечивает затухание переходных процессов, протекающих в сварочной цепи. Однако может возникнуть вопрос: влияют ли параметры t и L на качество переходного процесса и в какой мере. Для выяснения этого на ЭВМ проводилось моделирование динамики, описываемой уравнениями (1), (2), (4). При этом использовались следующие значения параметров контура и режима сварки: $L = 7 \cdot 10^{-4}$ Гн, $M = 0,38$ мм/(с·А), $E = 2$ В/мм, $R = 0,015$ Ом, $S_s = -0,02$ В/А, $S_a = 0,005$ В/А, $i_0 = 132$ А, $v_e = 50$ мм/с, $H = 17$ мм, где H — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны.

В качестве возмущающего воздействия рассматривалось скачкообразное изменение напряжения u_s на выходных клеммах источника сварочного тока:

$$u_s(t) = \begin{cases} 21 \text{ В при } 1,5 \leq t < 2,3 \text{ с,} \\ 25 \text{ В при } 2,3 \leq t \leq 2,8 \text{ с,} \\ 21 \text{ В при } t > 2,3 \text{ с.} \end{cases} \tag{19}$$

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2. На рис. 2, а изображено фактически два графика $\lambda(t)$, полученных при различных значениях параметра τ : $\tau_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ с и $\tau_2 = 1 \cdot 10^{-5}$ с. Но эти два графика практически совпадают, хотя постоянные времена τ_1 и τ_2 отличаются друг от друга на два порядка. Отсюда можно сделать вывод, что параметр τ не оказывает ощутимого влияния на переходные процессы в сварочной цепи.

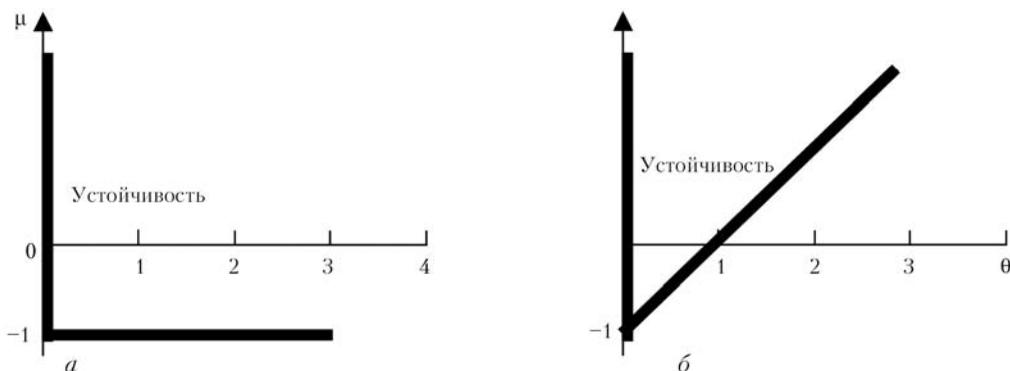


Рис. 1. Область асимптотической устойчивости без учета (а) и с учетом (б) малых параметров

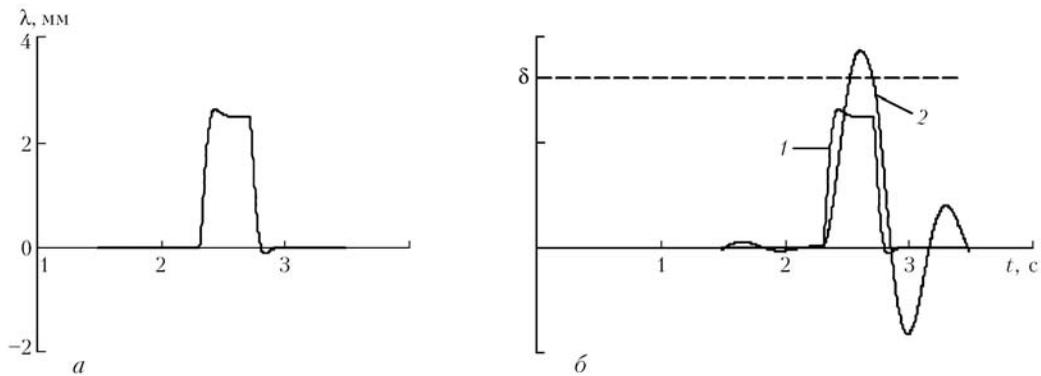


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования переходных процессов в сварочной цепи: а, б — см. в тексте

На рис. 2, б представлены графики $\lambda(t)$, полученные при $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с и двух различных значениях индуктивности. Кривые 1 и 2 характеризуют реакцию длины дуги на возмущение (19) соответственно при $L_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ Гн и $L_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ Гн. Сравним кривую 1 на рис. 2, б с кривой на рис. 2, а. Эти кривые не отличаются друг от друга, хотя $L_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ Гн на порядок меньше $L = 7 \cdot 10^{-4}$ Гн. Следовательно, малые значения индуктивности заметного влияния на переходный процесс $\lambda(t)$ не оказывают. Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 2, б показывает, что значительное увеличение индуктивности ($L_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ Гн на порядок больше L) приводит к существенному изменению характера кривой $\lambda(t)$.

Здесь следует обратить внимание на одно обстоятельство. Как видно из рис. 2, б, рост индуктивности приводит к увеличению не только времени переходного процесса, но и абсолютного значения отклонения длины дуги $|\lambda(t)|$ от установившегося ее значения l_0 . Очевидно, что при некотором значении L может произойти нарушение условия (8) — $|\lambda(t)| < \delta$ (рис. 2, б). В результате при автоматической дуговой сварке могут возникнуть неустойчивые режимы с квазипериодическими обрывами дуги или нежелательными короткими замыканиями (в зависимости от того, как расположена полоска $\delta = \min\{l_0, (l_k - l_0)\}$ относительно l_k).

Выводы

1. Результаты анализа и численного моделирования уточненной математической модели свидетельствуют о том, что инерционность дугового разряда практически не оказывает заметного влияния ни на устойчивость процессов, протекающих в цепи сварочного тока, ни на качество переходных процессов и в большинстве случаев ее можно не учитывать.

2. Для оценки области устойчивости целесообразно использовать критерий (17), устанавливающий ее зависимость не только от наклона вольт-амперных характеристик дуги и источника

сварочного тока в рабочей точке, но и от других параметров сварочной цепи.

3. Неустойчивые режимы автоматической дуговой сварки плавящимся электродом, обусловленные квазипериодическими обрывами дуги или нежелательными короткими замыканиями дугового промежутка, могут возникнуть и при выполнении условий устойчивости, если при этом произойдет нарушение условия (8), вызванное, в частности, чрезмерно большой индуктивностью источника сварочного тока.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 359 с.
2. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
3. Никитин В. П. Электрические машины и трансформаторы для дуговой сварки. — М.-Л.: Энергоиздат, 1934. — 260 с.
4. Львов Н. С., Гладков Э. А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов. — М.: Машиностроение, 1982. — 302 с.
5. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Вища шк., 1986. — 296 с.
6. Технология и оборудование сварки плавлением / Под общ. ред. Г. Д. Никифорова. — М.: Машиностроение, 1986. — 320 с.
7. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
8. Цыбулькин Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
9. Цыбулькин Г. А. Компенсация воздействия внешних возмущений на режим дуговой сварки плавящимся электродом // Там же. — 2007. — № 4. — С. 7–10.
10. Судник В. А., Ерофеев В. А. Исследование устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа // Изв. Тул. гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии в соединении материалов / Под ред. В. А. Судника. — Тула, 1999. — С. 110–120.
11. Fujimura H., Ide E., Inoue H. Joint tracking control sensor of GMAW // Trans. Jap. Welding Soc. — 1987. — 38, № 1, Apr. — P. 32–40.
12. Inoue K., Zhang J., Rang M. Analysis of detection sensitivity of arc sensor in welding process // Trans. of JWRI. — 1991. — 20, № 2. — P. 53–56.
13. Ushio V., Mao W. Dynamic characteristics of arc sensor in GMA welding in dip transfer mode // Quart. J. of the Japan Welding Soc. — 1997. — 15, № 2, May. — P. 272–280.
14. Девятков Б. Н., Жуков М. В., Хайтман С. М. Постоянная времени дуги, инерционность процесса и линейная мо-



- дель динамики плазмы // Изв. Сибир. отд. АН СССР. Сер. техн. наук. — 1980. — Вып. 1, № 3. — С. 57–70.
15. *Фурасов В. Д.* Устойчивость движения, оценки и стабилизация. — М.: Наука, 1977. — 248 с.
 16. *Воронов А. А.* Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979. — 336 с.
 17. *Кастри Дж.* Большие системы. Связность, сложность и катастрофы. — М.: Мир, 1982. — 216 с.
 18. *Барбаашич Е. А.* Введение в теорию устойчивости. — М.: Наука, 1967. — 223 с.
 19. *Мартынюк А. А.* Практическая устойчивость движения. — Киев: Наук. думка, 1983. — 248 с.
 20. *Постников М. М.* Устойчивые многочлены. — М.: Наука, 1981. — 176 с.
 21. *Цыбульский Г. А.* О влиянии флуктуаций электрического поля в столбе дуги на устойчивость процесса дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2002. — № 6. — С. 44–45.

The paper gives the results of analytical and experimental investigation of dynamic processes running in the welding circuit, and more precisely defines the areas of asymptotical stability of steady-state arc welding modes.

Поступила в редакцию 09.06.2008



WIN 2009 —

МИР ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫСТАВОК

05–08 февраля 2009

г. Стамбул

объединяет 4 международные торговые ярмарки:

МАШИНЫ — 14-я выставка «Запчасти. Детали. Машины. Обработка металлов»

СВАРКА — 9-я выставка «Сборочные, сварочные и режущие технологии»

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ — 3-я выставка «Технологии обработки поверхностей»

ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ — 3-я выставка «Оборудование для погрузочно-разгрузочных и логистических операций»

Контактная информация:

Г-жа Озлен Ерджан
Тел.: +90212 334-69-00
Факс: +90212 334-69-34
ozlen.ercon@hf-turkey.com
www.win-fair.com

Г-н Хакан Джулфа
Тел.: +90212 324-44-43,
доп. 126
Прямой тел.: +90212 284-26-52
Факс: +90212 324-32-12
hculfa@bilesim.com.tr
www.win-fair.com