



## СТАБИЛИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

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

Рассмотрен один из подходов к снижению внешних возмущений на скорость плавления электрода при роботизированной дуговой сварке. Изложена процедура синтеза структуры компенсирующего контура на основе принципа инвариантности. Приведены результаты компьютерного моделирования.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, роботизация, стабилизация режимов, компенсация возмущений, структурный синтез

Как известно, основными дестабилизирующими факторами при автоматической дуговой сварке плавящимся электродом являются непредсказуемые изменения: а) напряжения на выходных клеммах источника сварочного тока; б) скорости подачи электродной проволоки; в) расстояния между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны. Вопросам уменьшения влияния этих факторов на качество сварных соединений посвящено много работ, в которых предложен ряд интересных подходов [1–8], общая идея которых сводится к стабилизации тем или иным способом параметров режима дуговой сварки. В работе [7] введены перекрестные связи между напряжением источника сварочного тока и скоростью подачи электродной проволоки, частично стабилизирующие указанные параметры. Для более существенного снижения влияния дестабилизирующих факторов в работе [8] предложено использовать принцип поглощения, в основе которого лежит компенсация внешних возмущений за счет введения в структурную схему сварочного контура специально синтезированных компенсационных связей.

Между тем, при роботизированной дуговой сварке появляется принципиальная возможность компенсации вредного влияния дестабилизирующих факторов без структурных изменений в самом сварочном контуре. В частности, возникающие флуктуации напряжения на выходных клеммах источника сварочного тока в некоторых случаях можно скомпенсировать путем корректирующего управления расстоянием между торцом горелки, расположенной в захватном устройстве промышленного робота, и свободной поверхностью сварочной ванны в функции указанного напряжения.

В настоящей статье рассматривается задача синтеза структуры компенсирующего контура и

алгоритма корректирующего управления положением сварочной горелки с помощью манипуляционного робота на основе текущей информации об изменении напряжения источника сварочного тока.

Представим математическую модель сварочного контура в виде структурной схемы (рис. 1), где введены следующие обозначения:  $v_e$  — скорость подачи плавящегося электрода относительно сопла горелки;  $v_m$  — скорость плавления электрода;  $\Delta v = v_e - v_m$ ;  $H$  — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны;  $h$  — вылет электрода;  $l$  — длина дугового промежутка;  $E \equiv du_d/dl$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $u_a$  — напряжение на дуге;  $u_0$  — сумма приэлектродных падений напряжений;  $u_s$  — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока;  $\Delta u = u_s - u_a - u_0$ ;  $M \equiv dv_m/di$  — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока  $i_{ном}$  и вылета электрода  $h_{ном}$ ;  $R_* = R + S_a - S_s$ , где  $R$  — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки;  $S_a \equiv du_a/di$ ;  $S_s \equiv du_s/di$  — крутизна вольт-амперных характеристик дуги и источника сварочного тока при номинальном значении тока  $i_{ном}$ ;  $L$  — индуктивность сварочного контура;  $D = d/dt$  — оператор дифференцирования.

В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1, запишем уравнение скорости плавленого электрода в операторной форме

$$v_m = W(v_e - DH + \frac{1}{E} Du_s), \quad (1)$$

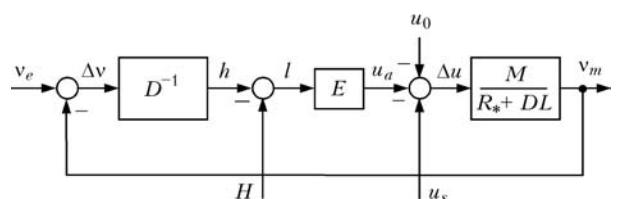


Рис. 1. Структурная схема сварочного контура



где

$$W = W(D) = \frac{1}{T_e T_s D^2 + T_s D + 1}; \quad T_e = \frac{L}{R_*}; \quad T_s = \frac{R_*}{EM}.$$

Из выражения (1) и рис. 1 видно, что внешние возмущения, действующие на скорость  $v_e$ , расстояние  $H$  и напряжение  $u_s$ , могут привести к отклонению скорости плавления электрода  $v_m$  от ее номинального значения, что естественным образом может сказаться на качестве свариваемого соединения. При роботизированной дуговой сварке флуктуации скорости подачи электродной проволоки  $v_e$ , как правило, незначительны. Непредсказуемые же изменения напряжения  $u_s$  на выходных клеммах источника сварочного тока чаще всего связаны с нестационарностью нагрузки в промышленной электрической сети. Поэтому рассмотрим случай, когда  $v_e = \text{const}$ , а возмущение номинального режима дуговой сварки вызвано кратковременным изменением напряжения  $u_s$ .

Проанализировав выражение (1), нетрудно заметить, что для обеспечения независимости скорости плавления электрода  $v_m$  от флуктуаций  $u_s$  достаточно выполнить условие

$$\frac{1}{E} Du_s - DH = 0, \quad (2)$$

которое, согласно теории автоматического управления [9–12], можно назвать условием инвариантности по отношению к возмущениям. Основной задачей теории инвариантности является, как известно, отыскание таких структурных решений, при которых отрицательное влияние внешних возмущений произвольного вида в минимальной степени сказывалось бы на протекании управляемого процесса. Наиболее благоприятная ситуация при решении этой задачи возникает тогда, когда внешние воздействия поддаются непосредственному измерению, хотя законы их изменения во времени заранее могут быть неизвестны. В нашем случае любые отклонения  $\xi(t) = u_s(t) - u_{s \text{ ном}}$ , где  $u_{s \text{ ном}}$  —

номинальное значение напряжения источника сварочного тока, могут быть легко измерены, поэтому для выполнения условия (2) достаточно обеспечить автоматическое управление расстоянием  $H$  в соответствии с алгоритмом

$$H(t) = H_{\text{ном}} + \Delta H(t), \quad (3)$$

где

$$\Delta H(t) = \frac{1}{E} \xi(t). \quad (4)$$

Ясно, что алгоритм (3), (4) в таком виде физически нереализуем, поскольку исполнительные механизмы, которые должны обеспечить пространственное перемещение сварочной горелки, имеют определенную инерционность. Поэтому с помощью математической модели инерционного звена модифицируем выражение (4) следующим образом:

$$\Delta H(t) = \frac{1}{E(TD + 1)} \xi(t), \quad (5)$$

где  $T$  — постоянная времени исполнительных механизмов.

Структура компенсирующего контура, построенная на основе алгоритма (3), (5), представлена на рис. 2. Из этого рисунка видно, что необходимое требование к структуре контура, формулируемое как принцип двухканальности [10], выполнено: возмущение  $\xi(t)$  передается по двум каналам и суммарное воздействие на выходе этих каналов  $\sigma = \Delta u - \Delta u_* = \xi TD / (TD + 1)$ , где  $\Delta u_* = \Delta u$  при  $\xi = 0$ , будет при малом  $T$  значительно меньше  $\xi(t)$ . Следовательно, скорость плавления электрода  $v_m$  становится в некоторой степени инвариантной по отношению к возмущающему воздействию  $\xi(t)$ .

Характерная особенность данного способа компенсации возмущений заключается в том, что компенсирующее устройство (КУ) (рис. 2), являющееся по существу внешним устройством по отношению к сварочному контуру, не вносит в отличие от других известных способов никаких изменений в его структуру. Сигнал  $\xi(t)$ , снимаемый с датчика напряжения  $u_s$ , после предварительной обработки поступает непосредственно в устройство управления манипуляционным роботом, который в соответствии с алгоритмом (5) перемещает сварочную горелку на расчетное расстояние  $\Delta H(t)$ , уменьшая тем самым влияние возмущения  $\xi(t)$  на скорость плавления электрода  $v_m(t)$ .

С целью экспериментальной проверки эффективности предлагаемого подхода к стабилизации скорости плавления электрода  $v_m$  проводилось компьютерное моделирование динамики процессов, протекающих в контуре при дуговой сварке.

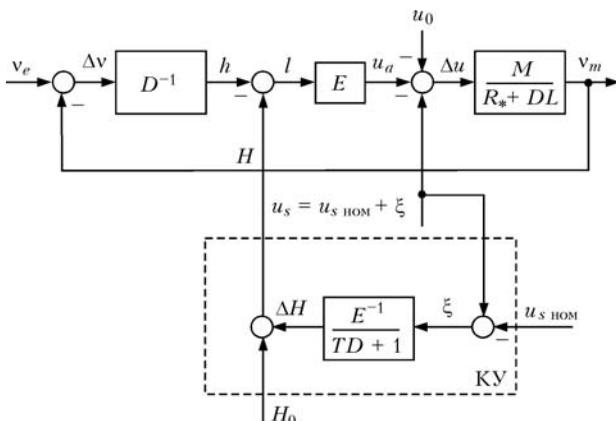


Рис. 2. Структурная схема компенсирующего контура

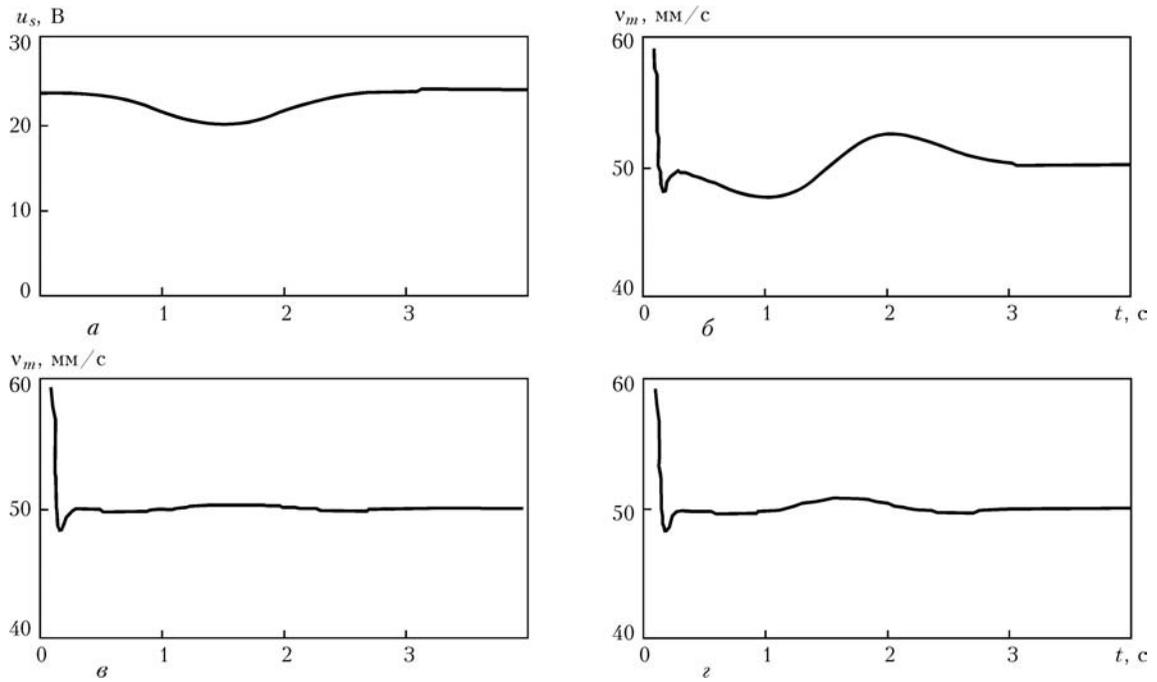


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования (пояснения в тексте)

Числовые значения параметров контура и режима дуговой сварки взяты следующие:  $L = 7 \cdot 10^{-4}$  Гн;  $R = 0,015$  Ом;  $S_a = 0,005$  В/А;  $S_s = -0,02$  В/А;  $u_s = 24$  В;  $u_0 = 12$  В;  $v_e = 50$  мм/с;  $H = 17$  мм;  $E = 2$  В/мм;  $M = 0,38$  мм/(А·с).

В качестве внешнего возмущения рассматривалось изменение напряжение  $u_s$  на выходных клеммах источника сварочного тока, закон изменения которого задавался зависимостью

$$u_s(t) = 24 - \xi(t), \quad (6)$$

где

$$\xi(t) = 4 \exp[-n(t - 1,5)^2]. \quad (7)$$

(Графики функции (6) при  $n = 2 \text{ с}^{-2}$  и  $n = 5 \text{ с}^{-2}$  показаны на рис. 3, а и рис. 4, а соответственно.)

Результаты моделирования процесса (1) при возмущениях вида (7) представлены на рис. 3 и рис. 4, где изображены графики изменения  $v_m(t)$  в сварочном контуре без КУ (рис. 3, б и рис. 4, б) и с КУ (рис. 3, в, г и рис. 4, в, г). Рассматривая эти графики, можно увидеть, что при отсутствии

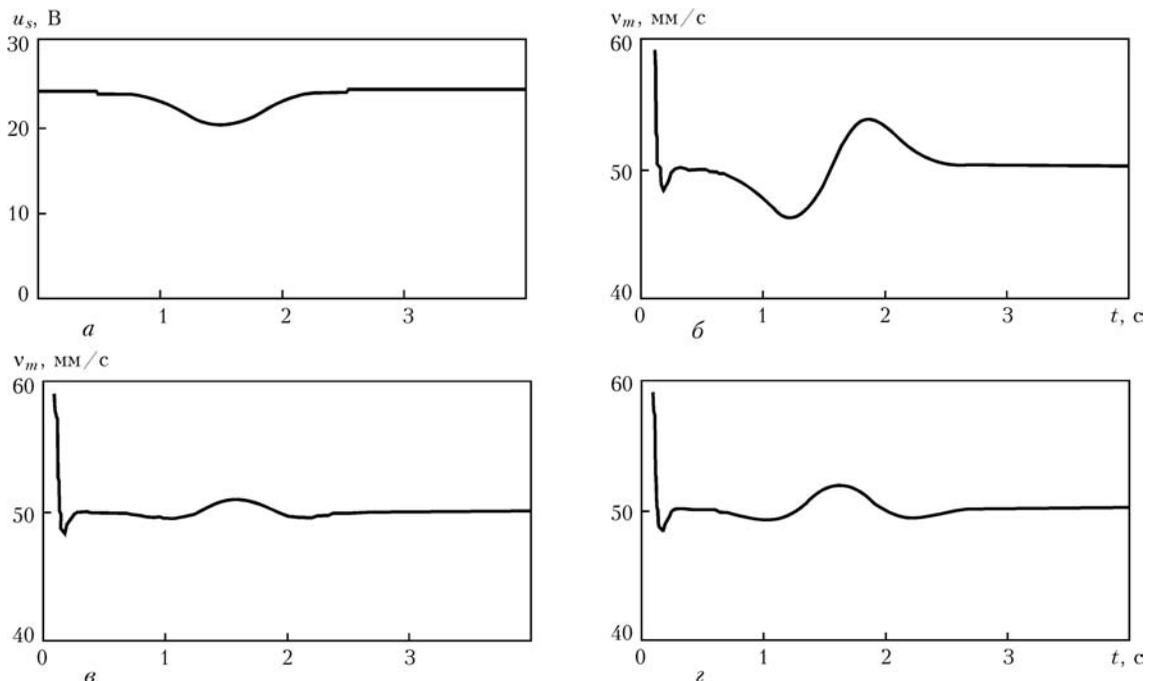


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования (пояснения в тексте)



КУ (см. рис. 1) возмущение (7) приводит к существенному изменению скорости плавления электрода  $v_m(t)$  (рис. 3, б и рис. 4, б). При подключении КУ (см. рис. 2) влияние возмущения (7) на скорость плавления  $v_m(t)$  значительно ослабевает (рис. 3, в, г и рис. 4, в, г).

Как и следовало ожидать, степень компенсации возмущения  $\xi(t)$  в данной схеме зависит от инерционности исполнительных устройств, перемещающих горелку. На рис. 3, г приведен график  $v_m(t)$ , полученный при  $T = 0,05$  с, а на рис. 4, г — при  $T = 0,1$  с. Из этих графиков видно, что с уменьшением инерционности исполнительных устройств степень компенсации возмущений возрастает.

Сравнив графики на рис. 3, в, г и рис. 4, в, г, нетрудно заметить, что более «медленные» возмущения влияют на скорость плавления  $v_m$  в меньшей степени, чем более «быстрые». Очевидно, что возмущения, скорость изменения которых меньше скорости затухания переходных процессов, в сварочном контуре компенсируются наиболее эффективно.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показали, что введение в систему роботизированного управления процессом дуговой сварки с плавящимся электродом дополнительной связи между источником сварочного тока и устройством управления движением горелки может оказаться достаточно эффективным сред-

ством компенсации медленнодействующих флуктуаций напряжения этого источника.

1. Патон Б. Е. Некоторые задачи в области автоматического регулирования сварочных процессов // Автомат. сварка. — 1958. — № 4. — С. 3–9.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 359 с.
3. Дюргеров Н. Г., Пенюши В. А., Сагиров Х. Н. О стабильности процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом // Свароч. пр-во. — 1966. — № 7. — С. 13–14.
4. Гладков Э. А. Автоматизация сварочных процессов. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976. — 176 с.
5. Лебедев А. В. Эффективность стабилизации среднего значения тока при полуавтоматической сварке // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 37–41.
6. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Вища шк., 1986. — 296 с.
7. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимановский // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
8. Цыбулькин Г. А. Компенсация воздействия внешних возмущений на режим дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2007. — № 4. — С. 7–10.
9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 711 с.
10. Цыбулькин Г. А. Инвариантность и устойчивость одного класса комбинированных программных систем с переменным масштабом времени программ // Теория инвариантности и ее применение. — Киев: Наук. думка, 1979. — Ч. 2. — С. 128–137.
11. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. — Киев: Гостехиздат УССР, 1963. — 376 с.
12. Цыкин Я. З. Синтез структуры стабилизирующих и инвариантных регуляторов // Докл. РАН. — 1996. — 347, № 5. — С. 607–609.

The paper deals with one of the approaches to reducing the external impacts on electrode melting rate in robotic arc welding. The procedure of synthesizing the structure of a compensating contour on the basis of invariance principle is set forth. Results of computer simulation are given.

Поступила в редакцию 18.01.2008

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.