

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

**В.И. Бойко, В.В. Перемитько, А.Т. Нельга,**

**Ю.И. Рейдерман, Е.А.Чередник**

*Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск*

*Рассмотрено влияние изменений вылета электрода на условия устойчивого горения дуги при сварке тонкой проволокой в среде CO<sub>2</sub>. Приведена принципиальная схема регулятора тока, обеспечивающего сохранение заданной величины сварочного тока посредством компенсации возмущений по вылету электрода. Приведены условия устойчивой работы регулятора с учетом условий устойчивости процесса саморегулирования.*

**Ключевые слова:** *изменение вылета электрода, сварка тонкой проволокой, процесс саморегулирования.*

*Розглянуто вплив змін вильоту електрода на умови стійкого горіння дуги при зварюванні тонким дротом у середовищі CO<sub>2</sub>. Наведено принципову схему регулятора струму, що забезпечує збереження заданої величини зварювального струму за допомогою компенсації збурювань після вильоту електрода. Подано умови усталеної роботи регулятора з урахуванням умов стійкості процесу саморегулювання.*

**Ключові слова:** *зміна вильоту електрода, зварювання тонким дротом, процес саморегулювання.*

Обычные регуляторы дуги [1, 2], так же как и саморегулирующаяся дуга, не отрабатывают возмущений по вылету электрода. Задача поддержания заданной величины сварочного тока при случайных или закономерных изменениях расстояния между токоподводящим мундштукком и изделием особенно актуальна при сварке тонкой проволокой.

При сварке в среде углекислого газа этими вопросами занимались многие и плодотворно, в частности были предложены решения, которые внедрены в практику и защищены авторскими свидетельствами. Но теоретического обоснования тогда не было дано. В настоящее время сварка тонкой проволокой приобрела как бы второе рождение. Если раньше она выполнялась в CO<sub>2</sub>, то сейчас варят в смеси CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+Ar. Сварку ведут на форсированных режимах.

Результаты проведенных экспериментов (рис. 1) показали, что в этом случае изменения тока значительны и могут выходить за допустимые пределы. Коэффициент наклона  $K = \Delta i_{\partial} / \Delta i_{\epsilon}$ , повышающийся с увеличением плотности тока и напряжения дуги, может достигать значений 10-11 а/мм, вследствие чего медленные изменения тока могут существенно влиять на глубину проплавления [4]. Известно, что система саморегулирования отрабатывает возмущения по длине дуги. Следовательно, происходящее при этом изменение режима сварки можно объяснить изменением вылета электрода, происшедшим в результате восстановления длины дуги.

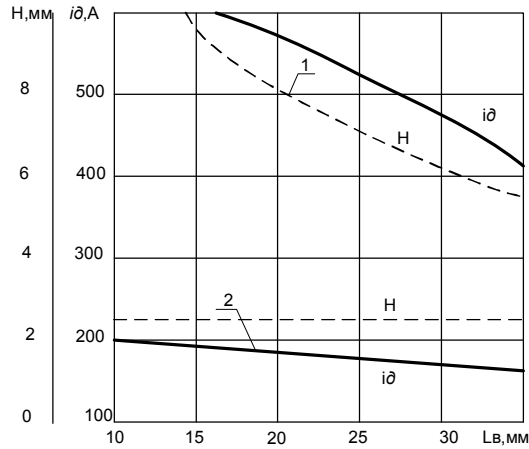


Рисунок 1 - Зависимость сварочного тока и глубины проплавления от вылета электрода ( $V_{св} = 40$  м/ч,  $d_{э} = 1,4$  мм): 1 -  $V_n = 20$  м/мин.,  $U_{д} = 44$  В; 2 -  $V_n = 4$  м/мин.,  $U_{д} = 24$  В. Проволока Св-08Г2С. Полярность - обратная

Как будет показано ниже, пренебрегать изменением падения напряжения на вылете электрода при сварке на больших плотностях тока нельзя. Установлено [5, 6], что изменения напряжения дуги являются алгебраической суммой изменений напряжений, определяемых длиной дуги при  $I_{д} = \text{const}$  и током при  $L_{д} = \text{const}$ :

$$\Delta U_{д} = \Delta U_{дl} + \Delta U_{дi}, \quad (1)$$

$$\Delta U_{дl} = K_{д} \Delta L_{д} \Big|_{I_{д}=\text{const}}, \quad (2)$$

$$\Delta U_{дi} = K_{дT} \Delta I_{д} \Big|_{L_{д}=\text{const}} \quad (3)$$

(здесь и далее смысл обозначений поясняется в табл. 1).

Результаты экспериментов (рис. 1) [3], а также опубликованные данные [7] по определению вольт-амперной характеристики вылета при сварке в углекислом газе позволяют (по аналогии с дугой) считать

$$\Delta U_{э} = \Delta U_{эл} + \Delta U_{ei}, \quad (4)$$

$$\Delta U_{эл} = K_{э} \Delta L_{э} \Big|_{I_{э}=\text{const}}, \quad (5)$$

$$\Delta U_{ei} = K_{эT} \Delta I_{э} \Big|_{L_{э}=\text{const}}. \quad (6)$$

По данным работы [7] при изменении тока от 200 до 600 а (для  $d_{э}=1,6$  мм) коэффициент  $K_{э}$  изменялся от 0,08 до 0,23 в/мм, соответственно коэффициент  $K_{эT}$  - от 0,004 до 0,006 в/а (для  $L_{э} = 20$  мм). При малых плотностях тока значения  $K_{э}$  и  $K_{эT}$  настолько малы по сравнению с  $K_{д}$  и  $K_{дm}$ , что влиянием изменения вылета можно пренебречь.

При высокой плотности тока эти величины (хотя они примерно на порядок ниже  $K_{д}$  и  $K_{дm}$ ) следует учитывать.

В связи с тем, что динамическое сопротивление вылета электрода включено последовательно с внутренним сопротивлением источника

питания и является балластным сопротивлением, суммарное сопротивление питающей системы равно:

$$\frac{1}{K_{nc}} = \frac{1}{K_u} - K_{BT}. \quad (7)$$

Таблица 1

Обозначение	Смысл обозначений		Размерность
	Математический	Физический	
$i_{\partial}$	$\partial I_{\partial}$	Отклонение тока дуги	А
$\tau_{\partial}$	-	Возмущение по длине дуги	См
$l_{\partial}$	$dL_{\partial}$	Отклонение длины дуги	См
$K_{\partial}$	$\partial U_{\partial} / \partial L_{\partial}$	Градиент потенциала в столбе дуги	$\text{в} \cdot \text{см}^{-1}$
$K_{\partial T}$	$\partial U_{\partial} / \partial I_{\partial}$	Динамическое сопротивление дуги	$\text{в} \cdot \text{а}^{-1}(\text{дм})$
$U_{\partial l}$	$U_{\partial l} = K_{\partial} l_{\partial}$	Отклонение напряжения дуги в результате ее удлинения при $l_{\partial} = \text{const}$	В
$U_{\partial i}$	$U_{\partial i} = K_{\partial i} i_{\partial}$	Отклонение напряжения дуги в результате отклонения тока при $L_{\partial} = \text{const}$	В
$K_{\partial \epsilon}$	$\partial U_{\epsilon} / \partial L_{\partial}$	Градиент потенциала по длине вылета электрода	$\text{в} \cdot \text{см}^{-1}$
$K_{\partial m}$	$\partial U_{\epsilon} / \partial I_{\partial}$	Динамическое сопротивление вылета электрода	$\text{в} \cdot \text{а}^{-1}(\text{дм})$
$U_{\partial l}$	$U_{\partial l} = K_{\partial \epsilon} l_{\epsilon}$	Отклонение напряжения на вылете электрода в результате изменения его длины при $I_{\partial} = \text{const}$	В
$U_{\partial i}$	$U_{\partial i} = K_{\partial m} i_{\partial}$	Отклонение напряжения на вылете электрода в результате изменения тока при $L_{\epsilon} = \text{const}$	В
$l_{\epsilon}$	$\partial l_{\epsilon}$	Отклонение длины вылета электрода	См
$K_u$	$\partial I_{\partial} / \partial U_u$	Коэффициент жесткости внешней характеристики источника питания	$\text{ав}^{-1}$
$L_c$	-	Суммарная индуктивность сварочной цепи	Гн
$K$	$\partial L_{\epsilon} / \partial U_i$	Коэффициент усиления регулятора тока	$\text{см} \cdot \text{в}^{-1}$
$T$	-	Постоянная времени регулятора	с
$v_n$	-	Скорость подачи электрода	$\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$
$v_{\partial}$	-	Скорость плавления электрода	$\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$
$K_{cm}$	$\partial v_{\partial m} / \partial I_{\partial}$	Коэффициент саморегулирования дуги по току	$\text{см} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{а}^{-1}$
$K_{cn}$	$\partial v_{\partial n} / K_{\partial} \partial I_{\partial}$	Коэффициент саморегулирования дуги по напряжению	$\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{в}^{-1}$
$R_{no}$	-	Сопротивление последовательной обмотки генератора	Ом

Поскольку  $K_{BT}$  вызывает дополнительный отрицательный наклон внешней характеристики источника питания,  $K_{BT}$  по отношению к  $1/K_u$  необходимо принимать отрицательным.

Знак  $1/K_u$  определяется, как обычно, видом внешней характеристики источника питания. При возмущениях по вылету характеристика питающей системы меняет угол наклона (рис. 2), что приводит к изменению напряжения и тока дуги. Сохранение заданного режима сварки возможно при автоматической компенсации изменений вылета соответствующим перемещением скользящего мундштука. Эту задачу выполняет регулятор тока (рис. 3).

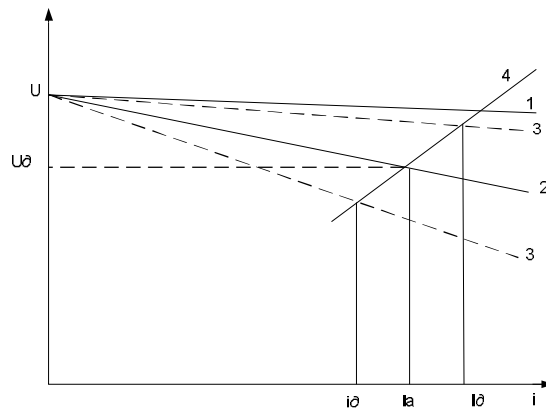


Рисунок 2 - Влияние динамического сопротивления вылета электрода на наклон внешней характеристики питающей системы: 1 – характеристика источника питания; 2 – характеристика питающей системы при изменениях вылета; 4 – вольт-амперная характеристика дуги

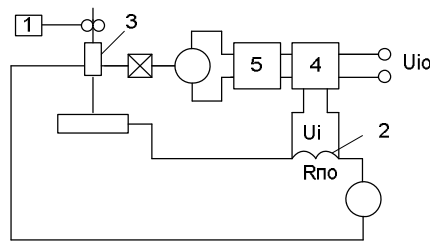


Рисунок 3 - Принципиальная схема регулятора тока: 1 – механизм подачи; 2 – последовательная обмотка сварочного генератора; 3 – скользящий мундштук; 4 – сравнивающее устройство; 5 – усилитель

Фактическое значение сварочного тока, преобразованное в пропорциональное падение напряжения  $U_i$  на последовательной обмотке сварочного генератора (или на выпрямительном столбе при использовании выпрямителя), сравнивается с напряжением  $U_{i0}$ , соответствующим заданному току при определенном вылете. Применение специальных балластных сопротивлений для получения достаточно мощного сигнала тока невозможно, так как при этом существенно изменяется характеристика источника. Усиленный сигнал рассогласования поступает на двигатель, связанный со скользящим мундштуком.

Совместная работа систем саморегулирования и регулятора тока протекает таким образом, что первая обрабатывает возмущения по длине дуги, а вторая компенсирует изменения вылета, вызванные работой первой.

На рис. 4 представлена обобщенная структурная схема системы саморегулирования (оплошная линия) и регулятора тока (пунктирная линия). При анализе приняты следующие допущения:

- 1 Скорость плавления электрода безынерционно следует за изменением тока.
- 2 Перенос металла является мелкокапельным (струйным).
- 3 Другие возмущения (кроме  $I_{\delta}$ ) отсутствуют.
- 4 Влияние проплавления основного металла не учитывается.

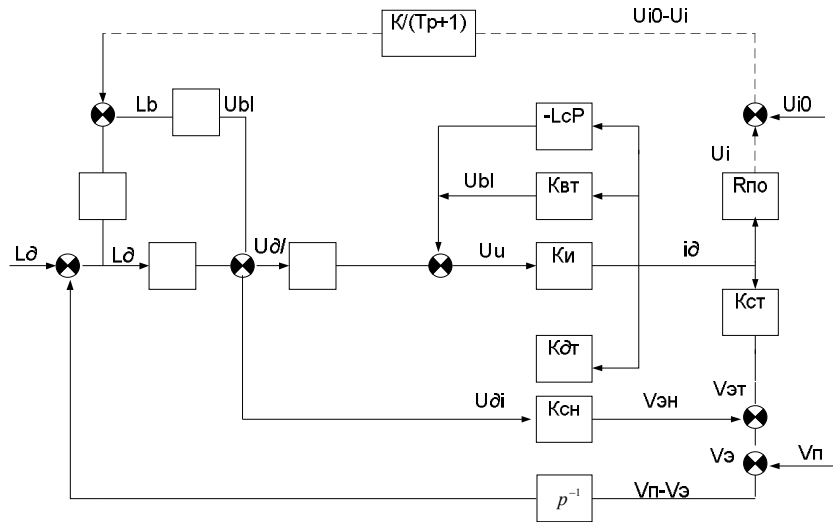


Рисунок 4 - Обобщенная структурная схема

Условия стабильности процесса саморегулирования и требования к характеристикам дуги и источника питания рассмотрены достаточно полно [5, 6] и ниже не рассматриваются. Только путем известных правил (преобразования структурной схемы) анализ ранее полученных [5] передаточных функций (в тексте записаны без порядковых номеров) проведен с учетом влияния вылета электрода.

Передаточная функция питающей системы с безынерционным источником питания (сварочный выпрямитель без индуктивности в сварочной цепи)  $W_{nc(p)} = K_{nc}$ ; с учетом выражения (7) имеет следующий вид:

$$W_{nc(p)} = \frac{1}{\frac{1}{K_u} - K_{BT}}. \quad (8)$$

Передаточная функция объекта регулирования (дуга - питающая система) выражена зависимостью

$$W_{nc\delta(p)} = -\frac{1}{K_y}, \quad K_y = K_{\delta T} - \frac{1}{K_{nc}}$$

с учетом выражения (7)

$$W_{nc\delta(p)} = -\frac{1}{K_{\delta T} - \left( \frac{1}{K_u} - K_{BT} \right)}. \quad (9)$$

Производя аналогичные вычисления для одноинерционного источника питания (сварочный генератор с независимым возбуждением, если пренебречь взаимоиндуктивностью между цепями якоря возбуждения), получим

$$W_{nc\partial(P)} = -\frac{1}{L_{cP} + K_{\partial T} - \left(\frac{1}{K_u} - K_{BT}\right)}. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) идентичны ранее полученным [5], если учесть выражение (7).

Передаточные функции для возмущения по длине дуги соответственно для безынерционного и одноинерционного источников питания принимают вид

$$W_{l\partial, i\partial(P)} = \frac{i\partial(P)}{l\partial(P)} = -\frac{K_{\partial} - K_{\partial e}}{K_y} \times \frac{P}{P + (K_{\partial} + K_{\partial e}) \cdot \left(\frac{K_{CT}}{K_y} - K_{CH}\right)}, \quad (11)$$

$$W_{l\partial, i\partial(P)} = -\frac{(K_{\partial} - K_{\partial e})P}{L_c P^2 + [K_y + (K_{\partial} - K_{\partial e})K_{CH}L_c]P} \rightarrow \dots \quad (12)$$

$$\dots \rightarrow \frac{(K_{\partial} - K_{\partial e})P}{(K_{\partial} - K_{\partial e})(K_{CT} + K_y K_{CH})}.$$

Так как  $(K_{\partial} - K_{\partial e})$  всегда больше нуля, условие устойчивости для системы с одноинерционным источником питания выражается неравенством

$$\frac{K_{CT}}{K_y} + K_{CH} > 0. \quad (13)$$

Для случая одноинерционного источника питания к условию (13) добавляется выражение

$$L_c > -\frac{K_y}{K_{CH}(K_{\partial} - K_{\partial e})}. \quad (14)$$

Таким образом, учет влияния вылета электрода не меняет сущности условий устойчивости процесса саморегулирования.

Передаточная функция замкнутой системы регулятора тока равна

$$\Phi_{(P)} = \frac{K_{\partial} K R_{no} W_{nc\partial(P)}}{(TP + 1)P + K_{\partial} K R_{no} W_{nc\partial(P)}}. \quad (15)$$

Для безынерционного источника питания

$$\Phi_{(P)} = -\frac{K_{\partial} K R_{no}}{K_y TP^2 + K_y P + K_{\partial} K R_{no}}; \quad (16)$$

для одноинерционного источника питания

$$\Phi_{(P)} = - \frac{K_e K R_{no}}{L_c T P^3 + (L_c + K_y T) P^2 + K_y P + K_e K R_{no}}. \quad (17)$$

Согласно алгебраическому критерию условие устойчивости для регулятора, описываемого выражением (16), определяется неравенством

$$K_y > 0. \quad (18)$$

Условие отсутствия колебательного переходного процесса при обработке возмущений по вылету определяется при решении характеристического уравнения

$$K_y T P^2 + K_y P + K_e K R_{no} = 0, \quad (19)$$

$$K_y \geq 4 T K_e R_{no}.$$

Для регулятора, описываемого формулой (17), условием устойчивости, помимо  $L_c > 0$ , является

$$(L_c + K_y T) K_y - L_c T K_e K R_{no} > 0 \quad (20)$$

или

$$K_y > T K_e K R_{no}.$$

Анализ качества переходного процесса в зависимости от  $L_c$  в связи с громоздкостью общего выражения целесообразно проводить для каждого конкретного случая отдельно (например, на диаграмме Вышнеградского). Вид передаточных функций (16) и (17) показывает, что регулятор является системой с астатизмом первого порядка, т. е. статическая ошибка обработки возмущений по вылету электрода равна нулю (реально определяется чувствительностью регулятора). Выражения (18) — (20) не противоречат условиям устойчивости саморегулирования и накладывают на них дополнительные ограничения.

#### ВЫВОДЫ

- 1 При сварке тонкой проволокой в среде  $CO_2$  на форсированных режимах необходимо учитывать влияние изменения вылета электрода.
- 2 Сохранение постоянства сварочного тока при возмущениях по длине дуги возможно посредством автоматического поддержания постоянства длины вылета электрода.
- 3 Условия устойчивой работы регулятора тока не противоречат условиям устойчивости процесса саморегулирования.
- 4 Получены зависимости для определения значений коэффициента усиления и запаздывания регулятора.

#### SUMMARY

##### RESEARCH OF TRANSIENTS OF AUTOMATIC WELDING BY THE THIN WIRE IN THE ENVIRONMENT OF PROTECTIVE GASES

*V.I. Boiko, V.V. Peremytko, A.T. Nelga,*

*J.I. Reiderman, E.A. Cherednik*

*Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dneprodzerzhinsk*

*Influence of changes of flight of electrode is considered on the terms of the steady burning of arc at welding a thin wire in the environment of  $CO_2$ . The of principle*

*chart of regulator of current, providing the maintainance of the set size of welding current by means of indemnification of indignations on flight of electrode is resulted. The terms of steady work of regulator are resulted taking into account the terms of stability of process of self-regulation.*

**Key words:** *change of a start of an electrode, welding by a thin wire, self-regulation process.*

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Патон Б.Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1966.
2. Каспраж Г.М. Структурная классификация и сравнительный анализ систем регулирования процесса дуговой сварки / Г.М. Каспраж, В.М. Щитова // Сборник “Автоматическое регулирование дуговой сварки”. - М.: Издательство АН СССР, 1953.
3. Золотых В.Т. Повышение производительности сварки в углекислом газе / В.Т. Золотых, Ю.Г. Белоусов и др. // Сварочное производство. - 1966. - № 8.
4. Кассов Д.С. Сварка углеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе на форсированных режимах / Д.С. Кассов, Ю.И. Рейдерман и др. // Прогрессивная технология и новые материалы. - 1967. - Вып. 2.
5. Рабинович И.Я. Некоторые вопросы теории устойчивости источников питания и систем регулирования дуговой сварки / И.Я. Рабинович // Новые проблемы сварочной техники. - Киев, Изд-во “Техника”, 1964.
6. Щитова В. М. Динамика процесса саморегулирования сварочной дуги с инерционными источниками питания / В.М. Щитова // Автоматическая сварка. – 1959. - №2.
7. Wienschenk Hans – Erich. Metzke Eckhard, Betrachtungen zur Wtrkstoffubertragung bei der CO<sub>2</sub> – Schutzgasschweibung. Ч. 1 и 2. “Schweibtechnik”, № 1, 13, 1963 (нем).

*Поступила в редакцию 9 августа 2009 г.*