

В. А. Лебедев, д-р техн. наук, valpaton@ukr.net, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины,
Ю. А. Ярос, канд. техн. наук, yaros.amity.mk.ua@gmail.com, НУК им. адмирала Макарова

Сравнительный анализ автоматических систем управления при автоматической сварке под флюсом

Обсуждаются возможность и целесообразность использования двух систем автоматического регулирования с комплексом обратных связей, организованных для решения задач стабилизации тока и напряжения сварочного процесса. Оценивается влияние инструментов на непрерывность и стабильность переноса электродного металла, а также возможность по управлению массопереносом. Показано, что обе исследованные системы автоматического регулирования обеспечивают стабильность сварочного процесса и необходимую точность и скорость отработки внешних возмущений, приводящих к изменению длины дуги.

Ключевые слова: сварка, наплавка, сварочная дуга, источник питания, подающий механизм, обратная связь, система автоматического регулирования, Украина

При автоматической сварке под флюсом обеспечиваются благоприятные условия как для стабильного (устойчивого) горения дуги, так и для технологической стабильности процесса в целом. Несмотря на это, изначально ведущие ученые проводили исследования, направленные на изучение влияния воздействия внешних возмущений на технологическую стабильность процесса, под которой понимается обеспечение постоянства геометрических размеров сварного шва или отклонение последних в допустимых пределах.

Разработка оптимальных систем управления, обеспечивающих отработку возмущений, а также непрерывность и стабильность переноса электродного металла, была и остается одной из важнейших задач при конструировании сварочного оборудования [1, 2]. Как показали многочисленные исследования, оборудование, построенное на принципе саморегулирования дуги, обеспечивает необходимую технологическую стабильность процесса в широком диапазоне режимов сварки [3].

Простота, надежность и низкая стоимость такого оборудования позволили широко использовать его в сварочном производстве различного назначения и в разных условиях. Применение более сложных и дорогостоящих систем управления, основанных на использовании сварочных головок с автоматически регулируемой по определенным зависимостям скоростью подачи и источников сварочного тока со сложными системами обратных связей, позволяет улучшить технологические результаты сварки и наплавки и расширяет диапазон режимов сварки, однако не всегда бывает экономически целесообразным и обоснованным.

Развитие и постоянное совершенствование сварочного оборудования по регулируемым электроприводам, в частности для механизмов подачи электродной проволоки [4], применение инверторных источников сварочного тока [5], тенденция к постоянному удешевлению систем управления и регулирования, их переход на качественно новый уровень по техническим характеристикам определили необходимость проведения комплекса новых

исследований, которые аналогичны проведенным ранее и отмечены в данной работе, но основываются на новых возможностях сварочной техники.

Цель настоящей работы — определить возможность и целесообразность использования систем автоматического регулирования с комплексом обратных связей, организованных для решения задач стабилизации тока и напряжения сварочного процесса, оценить влияние инструментов на непрерывность и стабильность переноса электродного металла (массоперенос), а также возможности по управлению массопереносом.

Необходимо заметить, что частично анализ влияния на сварочный процесс различных обратных связей по параметрам дугового процесса уже рассматривался [6], но не учитывал некоторые возможности нового поколения сварочного оборудования, например, в части их быстродействия.

Следует выделить два основных инструмента воздействия на сварочную дугу: источник сварочного тока и механизм подачи электродной проволоки. Ток и напряжение дугового процесса являются одновременно и средствами воздействия на дугу, и параметрами обратных связей для систем автоматического регулирования. При достаточно большом числе возможных вариантов обратных связей в работе рассмотрены граничные варианты, при которых каждый инструмент стабилизирует один параметр — ток или напряжение, — который и является для него обратной связью.

Был использован инверторный источник сварочного тока (ИИСТ) со следующими характеристиками, которые представлены на рис. 1:

1) ИИСТ имеет комбинированную внешнюю вольт-амперную характеристику (ВАХ) с крутопадающей рабочей частью, стабилизирующей сварочный ток, и жесткой характеристикой в области ниже 20 В с увеличенным посредством введения электронно перестраиваемых фильтров временем реагирования на сигнал возмущения. Система автоматического регулирования скорости подачи электродной проволоки с помощью положительной обратной связи по напряжению (при увеличении

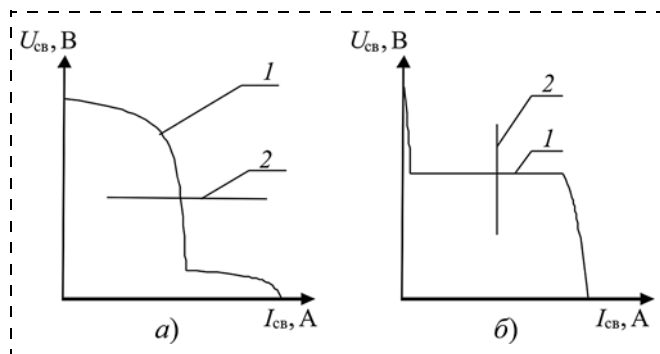


Рис. 1. Статические характеристики:
 а — 1-я система автоматического регулирования, б — 2-я система автоматического регулирования: 1 — источника сварочного тока, 2 — системы автоматического регулирования скорости подачи

напряжения увеличивается скорость подачи электродной проволоки и наоборот) стабилизирует напряжение сварки $U_{св}$ (рис. 1, а). Будем называть эту систему "1-я система автоматического регулирования";

2) ИИСТ имеет жесткую ВАХ, стабилизирующую напряжение и имеющую ограничение кратности тока короткого замыкания. Система автоматического регулирования скорости подачи электродной проволоки с помощью отрицательной обратной связи по току (при увеличении тока уменьшается скорость подачи электродной проволоки и наоборот) стабилизирует $I_{св}$ (рис. 1, б). Назовем эту систему "2-я система автоматического регулирования".

Для оценки эффективности обработки системами внешних возмущений (возмущений по вылету электродной проволоки) были проведены общепринятые эксперименты [2] по наплавке валиков на пластины стали 10ХСНД поперек фрезерованных пазов со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм и прямоугольных пазов глубиной 5 мм и 10 мм. Наплавку проводили проволокой Св 08Г2С диаметром 2 мм, под слоем флюса ОСЦ 45 на режимах 250А, 30В и 400А, 32В (250 А является минимально допустимым током для ИП с жесткой характеристикой [1]). Вылет электрода оставался неизменным, равным 25 мм. Режимы сварки и диаметр электродной проволоки были выбраны из соображений создания наиболее жестких условий для систем автоматического регулирования, так как исследования [3] доказывают, что как раз при сварке электродной проволокой малого диаметра необходимо точное сохранение вылета электрода, а кроме того, проволоки малого диаметра имеют наименьшее допустимое время восстановления процесса.

Проведенные исследования и анализ осциллограмм показали:

1) переход через паз со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм на обоих режимах с применением двух систем автоматики происходит стабильно, без резких изменений тока и напряжения. Обес-

печивается технологическая стабильность процесса (рис. 2, а);

2) переход через прямоугольный паз глубиной 5 мм на обоих режимах с применением обеих систем автоматического регулирования происходит стабильно, без резких изменений тока и напряжения. Обеспечивается технологическая стабильность процесса (рис. 2, б);

3) переход через прямоугольный паз глубиной 10 мм на режиме 250 А с применением обеих систем автоматического регулирования происходит с характерными резкими скачками тока и напряжения при резком увеличении вылета (длины дуги) (на входе в паз) и укорочении длины дуги и, соответственно, вылета (на выходе из паза) (рис. 3, а). Прерывание горения дуги отсутствует, время полной стабилизации тока и напряжения в обоих случаях практически одинаково и не превышает на входе и выходе из паза 0,5 с и 0,2 с соответственно. Увеличенное время стабилизации при входе объясняется увеличенной зоной возмущения за счет стекания жидкого металла в паз. На входе и выходе из паза наблюдается недопустимое уменьшение ширины шва, а при применении 2-й системы автоматического регулирования — даже прерывание дуги со дна паза на его кромку при выходе (рис. 2, в). Технологическая стабильность процесса не обеспечивается;

4) переход через прямоугольный паз глубиной 10 мм на режиме 400 А с применением обеих систем автоматики происходит без резких изменений тока и напряжения, однако, судя по осциллограммам, наблюдается увеличение амплитуд колебаний тока и напряжения при входе и выходе из паза на 5...7 % (рис. 3, б) и длительностью до 0,5 с. При этом обеспечивается технологическая стабильность процесса.

Полученные результаты позволяют утверждать, что обе системы автоматического регулирования стабильно обрабатывают плавные изменения длины дуги (скос спуска и подъема 45°) с большой ам-

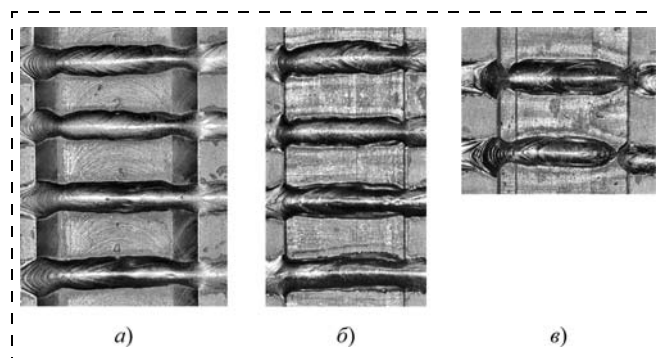


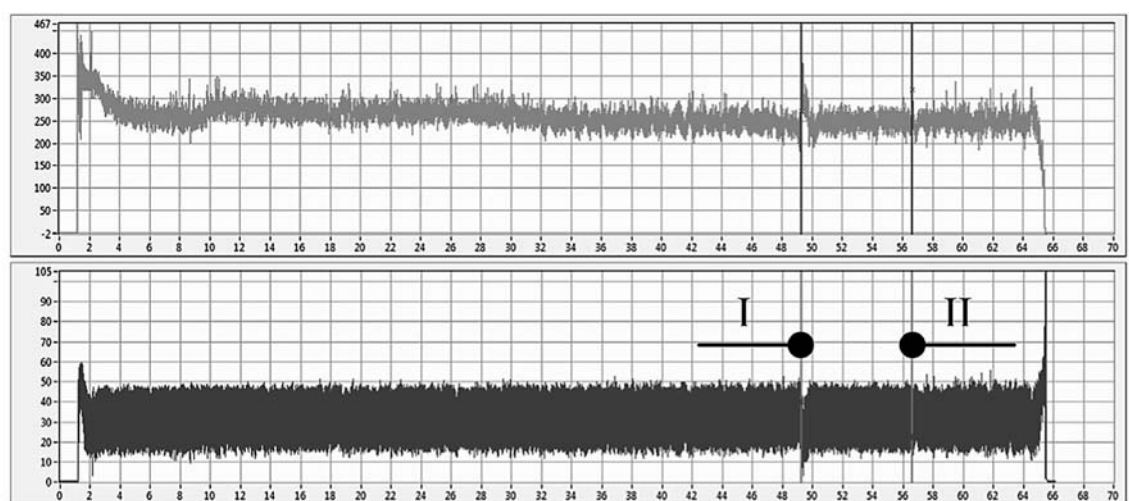
Рис. 2. Внешний вид наплавленных валиков:
 а — через паз со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм; б — через прямоугольный паз глубиной 5 мм; в — дефекты при наплавке через прямоугольный паз глубиной 10 мм, $I_{св} = 250$ А, $U_{св} = 30$ В

плитудой (10 мм) и резкие изменения (прямоугольный паз) со средней амплитудой (5 мм) возмущений во всем диапазоне режимов сварки, обеспечивая технологическую стабильность процесса. Обе системы автоматического регулирования стабильно обрабатывают резкие изменения длины дуги и с большой (10 мм) амплитудой возмущений, однако технологическая стабильность процесса обеспечивается только на форсированных (400 А) режимах сварки.

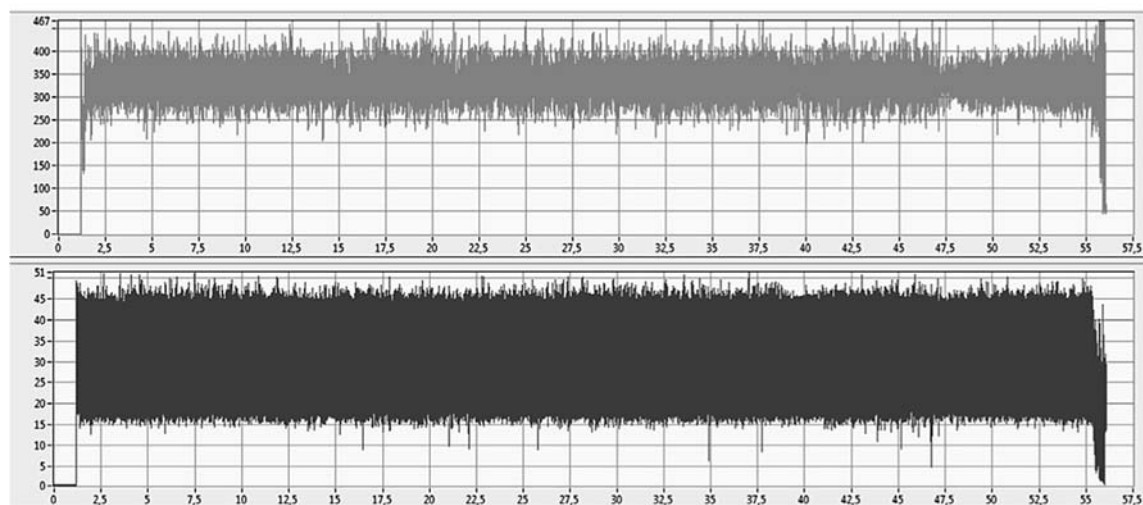
Известно [2], что время восстановления заданного режима сварки при сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки обратно пропорционально углу наклона ВАХ [2, 3]. При жесткой ВАХ время восстановления минимально, а при крутопадающей ВАХ — максимально.

Необходимо отметить, что в соответствии с результатами исследований применение системы автоматического регулирования с крутопадающей рабочей частью и автоматическим регулированием скорости подачи электродной проволоки с положительной обратной связью по напряжению не увеличивает время восстановления заданного режима сварки даже в сравнении с системой, имеющей жесткую ВАХ и автоматическое регулирование скорости подачи электродной проволоки с отрицательной обратной связью по току.

На основании проведенных исследований можно утверждать, что обе системы управления стабильно и достаточно четко обрабатывают внешние возмущения, вызывающие изменение длины дуги, и могут применяться при производстве оборудования для автоматической сварки под флюсом.



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы тока $I_{св}$ и напряжения $U_{св}$:

а — 1-я система автоматизации, $I_{св} = 250$ А, $U_{св} = 30$ В, вход (I) и выход (II) из прямоугольного паза глубины 10 мм на 49 с и 57 с соответственно; б — 2-я система автоматизации, $I_{св} = 400$ А, $U_{св} = 32$ В

Результаты математической обработки осциллограмм

Параметры	1-я система автоматического регулирования				2-я система автоматического регулирования			
	250А, 30В		400А, 32В		250А, 30В		400А, 32В	
	I_{CB}	U_{CB}	I_{CB}	U_{CB}	I_{CB}	U_{CB}	I_{CB}	U_{CB}
Среднее значение	249	29	392	32	243	30	405	32
Коэффициент вариации	0,022	0,079	0,017	0,061	0,195	0,063	0,056	0,049

Для исследования особенностей процесса при применении разных систем автоматического регулирования была проведена наплавка валика на ровную пластину на приведенных ранее режимах. Исследование осциллограмм процесса сварки-наплавки проводили с помощью информационно-

измерительной система IMS v3.1, имеющей возможность статистической обработки данных, результаты которых приведены в таблице и на рис. 3, 4.

Результаты статистической обработки осциллограмм позволяют отметить следующее:

1) источник сварочного тока стабилизирует параметр I_{CB} лучше, чем механизм подачи электродной проволоки. Стабилизация U_{CB} не может быть выделена в этом отношении. Так, коэффициенты вариации для стабилизации тока — 0,017...0,022 и 0,056...0,195, для стабилизации напряжения, соответственно 0,061... 0,079 и 0,049...0,063;

2) стабилизация параметров улучшается с увеличением силы тока. Низкая стабилизация I_{CB} при использовании 2-й системы автоматического регулирования на режиме 250 А (коэффициент вариации 0,195) объясняется предельностью режима для жесткой ВАХ источника сварочного тока [1].

Для анализа динамических характеристик системы экспериментальным путем были определены:

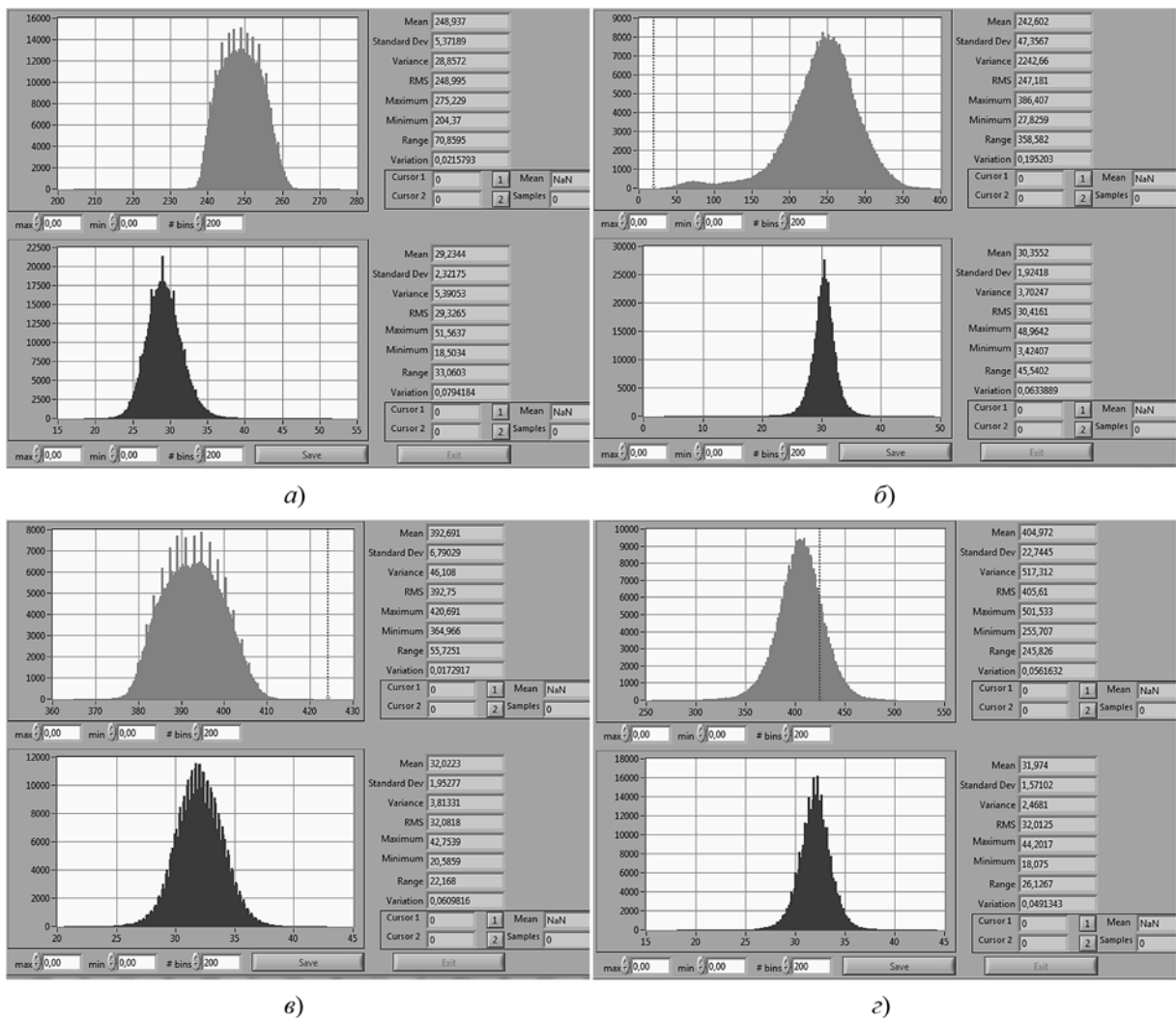


Рис. 4. Гистограммы осциллограмм тока и напряжения:

a, б — 1-я система автоматического регулирования; *в, г* — 2-я система автоматического регулирования; *a, б* — $I_{CB} = 250$ А, $U_{CB} = 30$ В; *в, г* — $I_{CB} = 400$ А, $U_{CB} = 32$ В

электромеханическая постоянная комплектного механизма подачи электродной проволоки с коллекторным электродвигателем и обмоткой возбуждения $T_{ЭМ} \approx 30$ мс и электрическая постоянная цепи источника сварочного тока $T_{ИП} \approx 1$ мс.

Полное время стабилизации процесса подачи двигателем подачи электродной проволоки $T_{ЭМ} \approx 90$ мс, а полное время стабилизации процесса источником сварочного тока питания $T_{ИП} \approx 3$ мс. Принимая в соответствии с работой [3] время восстановления заданного режима сварки при саморегулировании, которое однозначно обеспечивает устойчивость процесса, равным $T_c \approx 100$ мс, получим следующее соотношение:

$$T_c > T_{ЭМ} \gg T_{ИП}. \quad (1)$$

Неравенство (1) показывает, что динамических свойств комплектного механизма подачи электродной проволоки и источника сварочного тока вполне достаточно для обеспечения устойчивого процесса сварки под флюсом, при этом динамические свойства источника сварочного тока гораздо выше, чем механизма подачи. Динамических характеристик ИИСТ достаточно для влияния на электрические параметры сварочного процесса ($U_{св}$, $I_{св}$), и эти параметры должны стабилизироваться: при использовании 1-й системы автоматического регулирования — $I_{св}$, при использовании 2-й системы автоматического регулирования — $U_{св}$. Однако следует отметить, что, несмотря на огромную разницу динамических характеристик комплектного механизма подачи и источника сварочного тока, различия в стабилизации напряжения между подающим механизмом (1-я система автоматического регулирования) и источником сварочного тока (2-я система автоматического регулирования) небольшие. Об этом свидетельствуют коэффициенты вариации 0,061...0,079 и 0,049...0,063 соответственно (см. таблицу).

Для объяснения этого факта представим сварочную цепь как последовательную цепь постоянного тока, для которой справедливо уравнение

$$E_{ИП} - U_d = I(R_{ИП} + R_{сц}), \quad (2)$$

где $E_{ИП}$ — ЭДС источника питания; U_d — напряжение на дуге; $R_{ИП}$ — внутреннее сопротивление источника сварочного тока; $R_{сц}$ — сопротивление сварочных кабелей; I — обобщенное обозначение силы тока.

На основании (2) очевидно, что изменение силы тока I , а также внутреннего сопротивления источника сварочного тока $R_{ИП}$ компенсирует изменение напряжения на дуге U_d при $E_{ИП} = \text{const}$ (2-я система автоматического регулирования).

Так как значение силы тока I постоянно во всей сварочной цепи, то стабилизация тока источником сварочного тока (1-я система автоматического регулирования), согласно (4), стабилизирует и силу тока дуги I_d .

Отсутствие различий в колебаниях напряжения при использовании разных систем автоматического регулирования позволяет заключить, что мгновенное напряжение на дуге мало зависит от ВАХ. Очевидно, что мгновенное напряжение на дуге определяется длиной дуги в данный момент времени, которая изменяется циклически, от начала формирования капли до максимального размера капли, непосредственно перед отрывом и после слияния капли с ванной.

Выводы

1. Обе исследованные системы автоматического регулирования обеспечивают стабильность сварочного процесса и необходимую точность и скорость отработки внешних возмущений, приводящих к изменению длины дуги.

2. Учитывая, что времена восстановления заданного вылета при саморегулировании и при использовании системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по току сварки достаточно близки к равенству, а источник сварочного тока практически не улучшает стабилизацию напряжения, применение системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по току нецелесообразно в сравнении с более простой и дешевой системой саморегулирования.

3. Система автоматического регулирования с обратной связью по напряжению лучше стабилизирует ток, кроме того, применяемая в этом случае ВАХ источника расширяет диапазон технологических возможностей в сторону снижения минимально допустимого тока, поэтому может быть рекомендована для сварки тонколистового металла или наплавки.

4. Свойства динамических характеристик ИИСТ достаточны для стабилизации тока в процессе переноса электродного металла. Это позволяет предположить возможность влияния на процесс переноса электродного металла не только путем наложения импульсов тока, но и другими способами модуляции.

Список литературы

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Сборник трудов по автоматической сварке под флюсом. Киев: Изд-во АН УССР, 1948. С. 260—277.
2. Заруба И. И. Минимальное напряжение холостого хода генераторов постоянного тока для автоматической сварки под флюсом // Автоматическая сварка. 1950. № 3. С. 34—39.
3. Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Автоматическая сварка. 1952. № 1. С. 38—45.
4. Лебедев В. А. Электроприводы в современном механизированном и автоматизированном оборудовании для дуговой сварки // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. № 11 (87). С. 7—16.
5. Владимиров А. В., Хабзузов В. А., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Галышев А. А. Универсальный источник питания для дуговой сварки и плазменной резки // Автоматическая сварка. 2011. № 1. С. 41—46.
6. Лебедев В. А., Пичак В. Г. Полуавтоматы для сварки и наплавки типа ПШ 107 // Автоматическая сварка. 1998. № 7. С. 38—42.

Comparative Analysis of the Automatic Control Systems during Automatic Submerged Arc Welding

V. A. Lebedev, valpaton@ukr.net,

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 03650, Ukraine,

Yu. A. Jaros, yaros.amity.mk.ua@gmail.com,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolayev, 54025, Ukraine

Received on January 29, 2015

The paper analyzes the feasibility and advisability of the use of the multiple automatic control systems with a feedback complex, intended to meet the challenges of the current and voltage stabilization of the welding process, and assess the impact of tools on the continuity and stability of the electrode metal transfer, as well as a possibility of the mass transfer control.

The authors investigated the cruise control wire feed with a positive feedback voltage of the welding process and negative current feedback arc characteristics for different types of the welding power source. In order to evaluate the effectiveness of development of a system of external disturbances, experiments were conducted on the conventional surfacing rolls on 10HSND plate steel with grooves milled across. The authors used a welding current source inverter of a modern type. Analysis of the results was carried out on the basis of the statistical processing of the current and voltage waveforms of the arc in a number of experiments. It was shown that both the investigated and the automatic control systems ensure stability of the welding process and the required accuracy and speed of running of the external disturbances, leading to changes in the arc length. The dynamic characteristics of the welding power source inverter are sufficient to stabilize the current in the electrode metal transfer. The automatic control system with a negative feedback welding current does not have an impact on the welding process and the system of self-regulation of the arc, and therefore its use in some cases is inappropriate. Understanding, that stabilization is one of the possible boundary impacts, suggests a possibility of influencing the process of the electrode metal transfer not only by imposition of the current pulses, but also by its more complex modulation.

Keywords: welding, overlaying welding, arc welding, SP, feeder, feedback, automatic control system, Ukraine

For citation:

Lebedev V. A., Jaros Y. A. Comparative Analysis of the Automatic Control Systems during Automatic Submerged Arc Welding, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 409–414.

DOI 10.17587/mau.16.409-414

Reference

1. Paton B. E., Lebedev V. K. *Sbornik trudov po avtomaticheskoi svarke pod flyusom* (Collection of works by automatic submerged arc welding), Kiev, Publishing House of Academy of Science of USSR, 1948. P. 260–277 (in Russian).

2. Zaruba I. I. *Minimal'noe napryazhenie kholostogo khoda generatorov postoyannogo toka dlya avtomaticheskoi svarki pod flyusom* (Minimum load voltage DC generators for automatic submerged arc welding), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1950, no. 3, pp. 34–39 (in Russian).

3. Paton B. E. *Samoregulirovanie dugi pri svarke plavyashchimsya elektrodom* (Self-regulation of arc welding consumable electrode), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1952, no. 1, pp. 38–45 (in Russian).

4. Lebedev V. A. *Elektroprivody v sovremennom mekhanizirovannom i avtomatizirovannom oborudovanii dlya dugovoi svarki* (The actuators in modern mechanized and automated equipment for arc welding), *Elektrotekhnicheskie i Komp'yuternye Sistemy*, 2013, no. 11 (87), pp. 7–16 (in Russian).

5. Vladimirov A. V., Khabuzov V. A., Lebedev V. A., Maksimov S. Yu., Galyshev A. A. *Universal'nyi istochnik pitaniya dlya dugovoi svarki i plazmennoi rezki* (Universal power supply for arc welding and plasma cutting), *Avtomaticheskaya Svarka*, 2011, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).

6. Lebedev V. A., Pichak V. G. *Poluavtomaty dlya svarki i naplavki tipa PSh 107* (Semi-automatic welding and welding-type PSH 107), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1998, no. 7, pp. 38–42 (in Russian).

Corresponding author:

Lebedev Vladimir A., D. Sc., Chief Designer, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy Of Sciences Of Ukraine, Kiev, 03650, Ukraine, e-mail: valpaton@ukr.net

ИНФОРМАЦИЯ

3–9 сентября 2015 г.

на Черноморском побережье в пос. Дивноморское (Краснодарский край, Геленджикский район)

состоится

Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям

ТЕМАТИКА КОНГРЕССА:

- Биоинформатика
- Интеллектуальные САПР, CASE-, CALS-технологии
- Искусственный интеллект и мягкие вычисления
- Представление и извлечение знаний
- Многоагентные системы и принятие решений
- Перспективные информационные технологии
- Проблемы образования
- Синергетика и моделирование сложных систем
- Эволюционное моделирование и генетические алгоритмы
- Экспертные системы
- Информационная безопасность
- SAP-технологии
- Инструментальные, математические и информационные средства экономики

Подробную информацию о конгрессе см. на сайте:

<http://icai.tti.sfedu.ru/>