

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

**И.И. Лычко, К.А. Ющенко, С.А. Супрун, С.М. Козулин**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Изложены результаты экспериментальных исследований связи процессов, протекающих в зоне плавления электродной проволоки, с электрическими параметрами режима электрошлаковой сварки. Методика выполнения экспериментов предусматривала электрошлаковую сварку образцов из стали 09Г2С толщиной 60 мм на режимах, идентичных режимам, при которых ранее выполняли фото- и киносъемку зоны сварки с применением оптически прозрачной среды. С использованием датчиков Холла, модуля АЦП E-140 и программного обеспечения «Power Graph» осуществляли высокоскоростную запись электрических параметров режима (10 тыс. записей в с). Одновременно проводили замеры температуры шлаковой ванны вблизи зоны плавления электродной проволоки. Выполняли анализ и сопоставление визуальных наблюдений зоны сварки через оптически прозрачную среду с характеристиками режима электрошлаковой сварки ( $U_c$ ,  $I_c$ ,  $V_{п.п.}$ ), в результате чего подтверждено циклическое существование в расплавленном шлаке между электродной проволокой и жидким металлом некоего ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом. Библиогр. 9, рис. 4.

*Ключевые слова:* электрошлаковая сварка, шлаковая ванна, межэлектродный промежуток, скоростная запись электрических параметров режима, активная зона, энергетическое ядро, «разряд», плавление и перенос жидкого металла, скоростная кино-, фотосъемка

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является одной из разновидностей сварки плавлением и основана на использовании тепловой энергии, выделяющейся при прохождении электрического тока через расплавленный флюс. Этот процесс имеет ряд специфических характеристик, которые определяют приоритетность и объемы его применения в различных отраслях народного хозяйства при сварке металла толщиной 40 мм и более за один проход [1].

Изучение физической природы ЭШС позволит не только повысить эффективность управления сварочным процессом для оптимизации размеров сварного шва и глубины проплавления основного металла, но и изыскать приемы снижения тепловложения в зоне сварки с целью сокращения объема последующей термической обработки металла сварного соединения, необходимой для восстановления высоких служебных характеристик сварной конструкции.

Поэтому изучение процессов, протекающих в межэлектродном промежутке при выполнении ЭШС, было всегда актуальным. Однако часто, в силу текущих запросов сварочного производства, указанное исследование уступало решению практических задач при разработке технологий сварки конкретных металлоконструкций тяжелого машиностроения, гидроэнергетики и других отраслей.

С начала разработки электрошлакового сварочного процесса исследователи стремились заглянуть в зону сварки. Первичные представления о процессах, происходящих в шлаковой ванне, были

получены с использованием приемов косвенного наблюдения и изложены в работах [2–6]. Первые сведения о форме плавящегося электрода и межэлектродного промежутка были получены Г. З. Волошкевичем [2, 3]. Однако в силу ряда технических причин, полученные результаты не позволили изучить динамику процессов, происходящих в межэлектродном промежутке.

Позднее авторам работ [7, 8] удалось более успешно осуществить прямое наблюдение процесса ЭШС и его скоростную киносъемку путем проведения специально подготовленных экспериментов с применением термостойкого стекла, которое было установлено вместо медного водоохлаждаемого ползуна.

Известно, что явления, наблюдаемые в зоне сварки, возникают в процессе преобразования электрической энергии в тепловую (электрические параметры режима сварки). Их характер зависит также от физико-химических свойств шлаковой ванны и электродного материала.

Согласно литературным данным [1–3, 9] нагрев и плавление проволочного электрода происходит в области активного контакта его поверхности, которая смачивается шлаком. Площадь этой поверхности переменная и зависит от параметров режима сварки (значения напряжения на шлаковой ванне, сварочного тока, диаметра и скорости подачи электрода, глубины шлаковой ванны и др.). Для установившихся процессов ЭШС, используемых на практике, площадь поверхно-

сти контакта может изменяться в широких пределах, например, для проволоки диаметром 3 мм — 14...110 мм<sup>2</sup> [9]. Расплавленный электродный металл проволоки стекает по ее боковой поверхности в промежутке между концом электрода и металлической ванной. В результате компьютерной обработки кадров кино съемки шлаковой ванны были выделены ее характерные участки: зона наиболее высоких температур, которая непосредственно контактирует с концом электрода, и зона, температура которой ниже, чем у указанной, но более высокая, чем у основного объема шлаковой ванны [9].

Результаты исследования через оптически прозрачную среду электрошлакового сварочного процесса проволочным электродом подтвердили известные основные определения физической сущности этого процесса [1], а также позволили развить представления о явлениях, имеющих место в активной зоне шлаковой ванны, от которых зависят плавление основного металла и формирование шва [9].

На основании прямых визуальных наблюдений зоны сварки показано существование в расплавленном шлаке между концом электродной проволоки и металлической ванной некоего энергетического ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом в зоне сварки.

При исследовании и анализе характеристик режима сварки зафиксированы:

- циклический (длительностью 0,3...0,6 с) характер изменения размеров этого ядра;
- возрастание до критического состояния энергетических характеристик ядра перед завершением цикла;
- показано, что понятие глубины металлической ванны, обычно определяемое по макрошлифам, не отвечает действительным ее мгновенным параметрам.

При этом высказано предположение, что «взрывное» изменение энергетических характеристик области между торцом электродной проволоки и металлической ванны перед завершением цикла происходит при образовании паров шлака. Эта область при переходе шлака из жидкого в парогазовое состояние за весьма короткое время увеличивается в объеме с ростом электропроводности и температуры пара шлака, достижением максимальной степени ионизации межэлектродного промежутка, возрастанием давления, что в совокупности приводит к взрывному завершению цикла.

При сокращении межэлектродного промежутка за счет испарения шлака возникает «разряд»\*, в объеме которого увеличивается давление и вы-

деление тепловой энергии. Давление «разряда» передается металлической ванне и всему объему шлака в импульсном режиме, посредством электрогидродинамических ударов, вызывающих в металлической и шлаковой ванне интенсивные тепловые потоки. Под действием этих потоков оплавляются свариваемые кромки и нагревается шлаковая ванна [9]. Приведенные результаты исследований были получены путем исследования визуальных явлений в шлаковой ванне без соответствующей записи электрических параметров режима сварки.

Цель настоящей работы состояла в изучении взаимосвязи между явлениями, визуально наблюдаемыми в зоне сварки, и основными электрическими параметрами режима сварочного процесса.

Методика выполнения экспериментальных работ:

1. С использованием аппарата А-535УХЛ4 и источника питания переменного тока ТШС 3000-3 выполняли ЭШС образцов из низколегированной стали 09Г2С толщиной 60 мм на режимах, идентичных тем, которые применялись в работе [8] ( $n = 2$ ,  $d_s = 3$  мм,  $h_{ш} = 45$  мм,  $V_{п.п} = 112$  и  $158$  м/ч,  $B = 27$  мм, флюс АН 8)\*\*;

2. В процессе сварки выполняли скоростную запись электрических параметров режима ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) с использованием датчиков Холла, модуля АЦП Е-140 и программного обеспечения «Power Graph»;

3. Численные значения электрических параметров сварочного процесса ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) фиксировались с частотой 10 тыс. записей в секунду (частота кино съемки составляла 100 кадров в секунду);

4. Одновременно с записью параметров режима выполняли замеры температуры шлаковой ванны с цифровой записью результатов. Термопару ВР 5/20, установленную в защитный термостойкий чехол, рабочий (погружаемый в шлаковую ванну) торец которого футеровали самоспекающейся графитной массой, погружали в шлаковую ванну на глубину 30 мм. Показания и запись потенциалов термопар в непрерывном режиме осуществляли с помощью цифрового вольтметра ВЦ 7-21 и видеокамеры. Так как известные приборы записи температуры весьма инерционны, предложенный прием позволил с более высоким разрешением зафиксировать изменения температуры во времени.

Схема электрических соединений при выполнении экспериментов с целью регистрации основ-

\* Для уточнения физической сущности термина «разряд» будут проведены дополнительные исследования.

\*\* В работе принимали участие Б. В. Цибуленко, В. Г. Ярмак, Г. С. Шульженко, Н. О. Червяков.

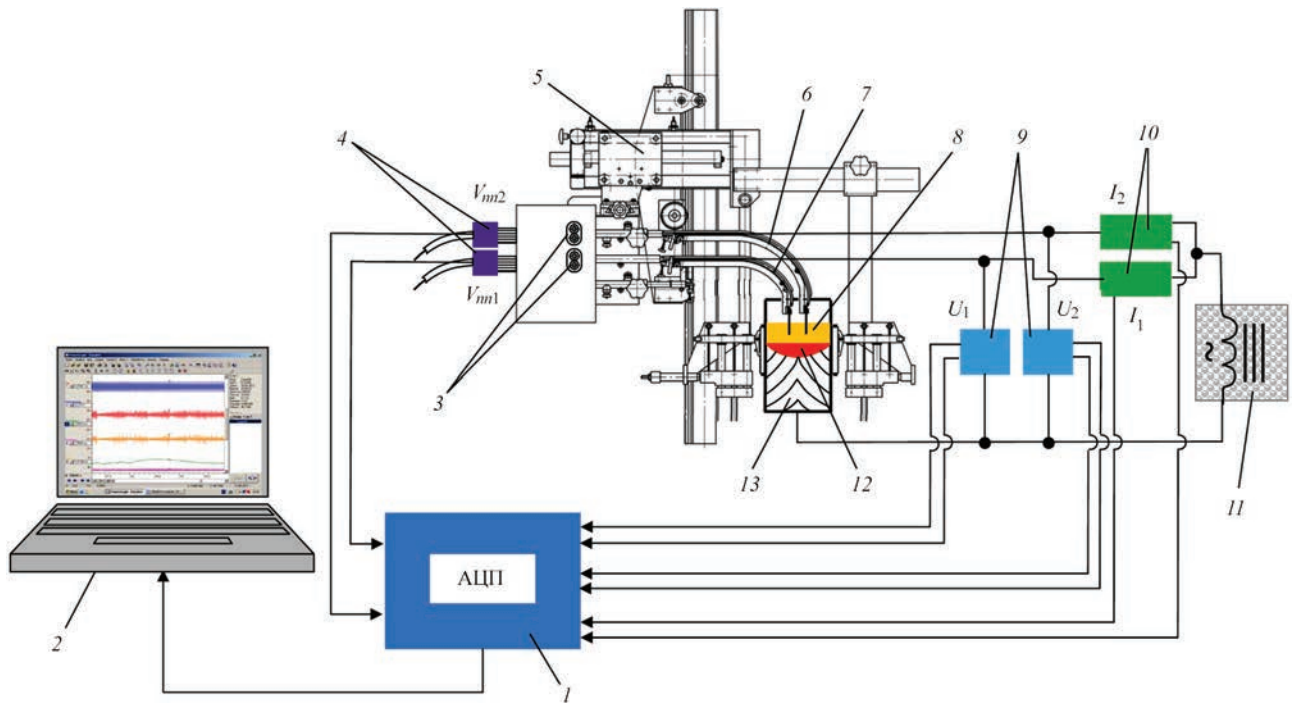


Рис. 1. Схема проведения высокоскоростной записи электрических параметров режима ЭШС: 1 — модуль АЦП Е-140; 2 — персональный компьютер; 3 — подающие ролики; 4 — датчики скорости подачи электродных проволок; 5 — сварочный аппарат А-535 УХЛ4; 6, 7 — верхний и нижний мундштуки; 8 — шлаковая ванна; 9 — датчики напряжения на мундштуках; 10 — датчики сварочного тока; 11 — источник питания; 12 — металлическая ванна; 13 — сварной шов

ных электрических параметров режима приведена на рис. 1.

Общий вид полученных осциллограмм основных электрических параметров режима сварки двумя электродными проволоками показан на рис. 2. Здесь представлен фрагмент скоростной записи сварочного тока, напряжения на шлаковой ванне и скорости подачи электродных проволок на обоих мундштуках (рис. 2, а).

В результате анализа и сопоставления визуальных эффектов киносъемки и записанных осциллограм электрических параметров режима на качественном уровне установлено следующее.

На осциллограммах установившегося режима ЭШС, как и на кадрах киносъемки, отчетливо зафиксирован циклический характер протекания сварочного процесса, который свойственен каждому из двух проволочных электродов и определяется динамикой плавления каждого электрода. При этом наблюдается некоторое смещение пиковых значений сварочного тока, несмотря на то, что оба электрода питаются от одного источника (рис. 2, а, б).

Показано, что размеры энергетического ядра, значения сварочного тока и формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. При этом на протяжении всего процесса ЭШС в межэлектродном промежутке наблюдаются два вида циклов различной продолжительности, завершающихся «разрядами», отличающимися своей интенсивностью (рис. 2). Каждый цикл завершается образованием «разряда» в ме-

таллическую ванну. После каждых 10...13 циклов продолжительностью 0,3...0,4 с, завершающихся «разрядами» сравнительно малой мощности в районе зеркала металлической ванны, наблюдаются циклы длительностью 0,5...0,7 с, завершающиеся «разрядами» большой мощности, при которых масса ядра достигает дна металлической ванны, что вызывает выплеск перегретого металла ванны на кромки основного металла с высокой скоростью (1,1...1,5 м/с).

Так, на участке протяженностью 3,5 с, отмечено 15...17 «разрядов» сравнительно малой мощности (рис. 2, а). Для начала цикла длительностью 0,4 с, завершающегося разрядом малой мощности, (рис. 2, б), характерны низкое значение сварочного тока, равное 312 А, и минимальный размер энергетического ядра. К моменту завершения «разряда» сварочный ток плавно возрастал до 622 А. Одновременно с ростом тока увеличивался размер энергетического ядра, которое смещалось к зеркалу металлической ванны. Напряжение на шлаковой ванне изменялось незначительно — в пределах 1,0...1,5 В.

На рис. 2, в приведен фрагмент осциллограммы, где интенсивность нарастания тока имела иной характер. Здесь цикл длительностью 0,5 с, завершающийся «разрядом» большой мощности, начинается при значении сварочного тока, равном 412 А, и заканчивается при значении 1580 А. При этом одновременно с ростом сварочного тока увеличивается площадь энергетического ядра от

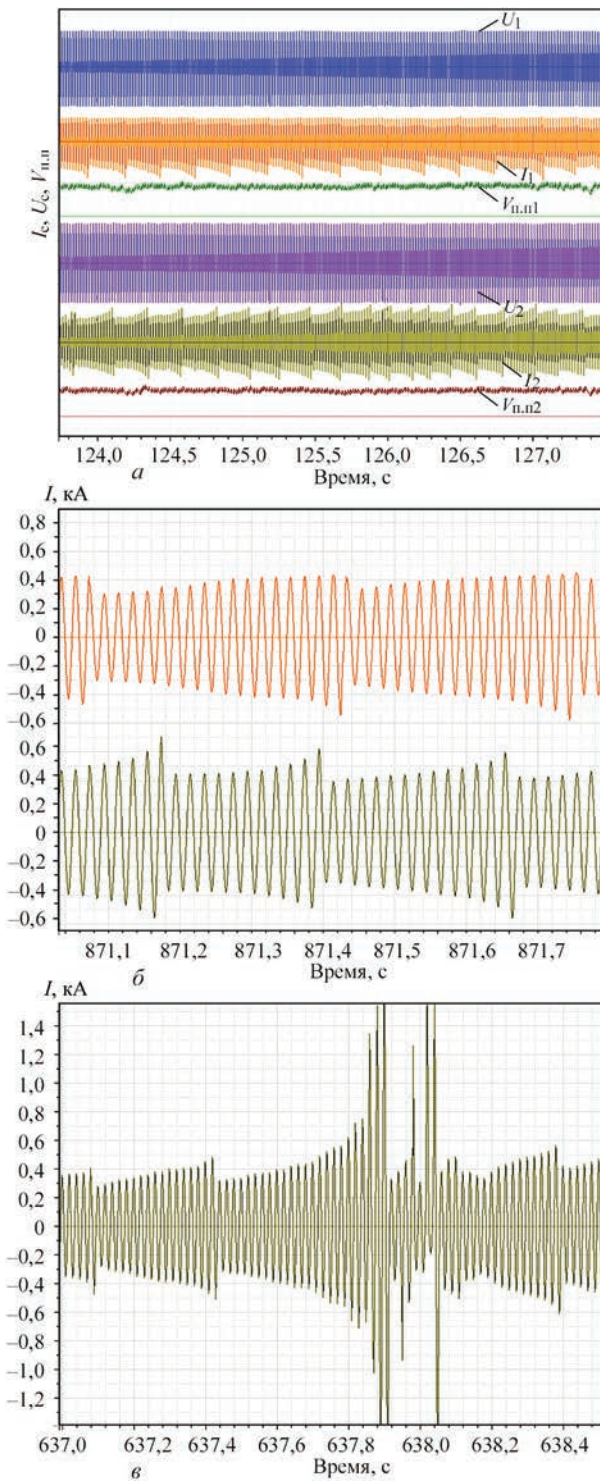


Рис. 2. Фрагменты записи осциллограмм параметров режима ЭШС ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) двумя электродами: *a* — общий вид процесса протяженностью 3,8 с; *б* — участок записи  $I_c$  в интервале 871,0...871,7 с; *в* — осциллограмма  $I_c$  на втором электроде в интервале 637,0...638,4 с

25 до 200 мм<sup>2</sup>. На участке резких пиков тока напряжение на шлаковой ванне уменьшается на 3,0...4,0 В.

Разрешающая способность использованной методики измерений электрических параметров режима обеспечила возможность зафиксировать изменения сварочного тока и напряжения, начи-

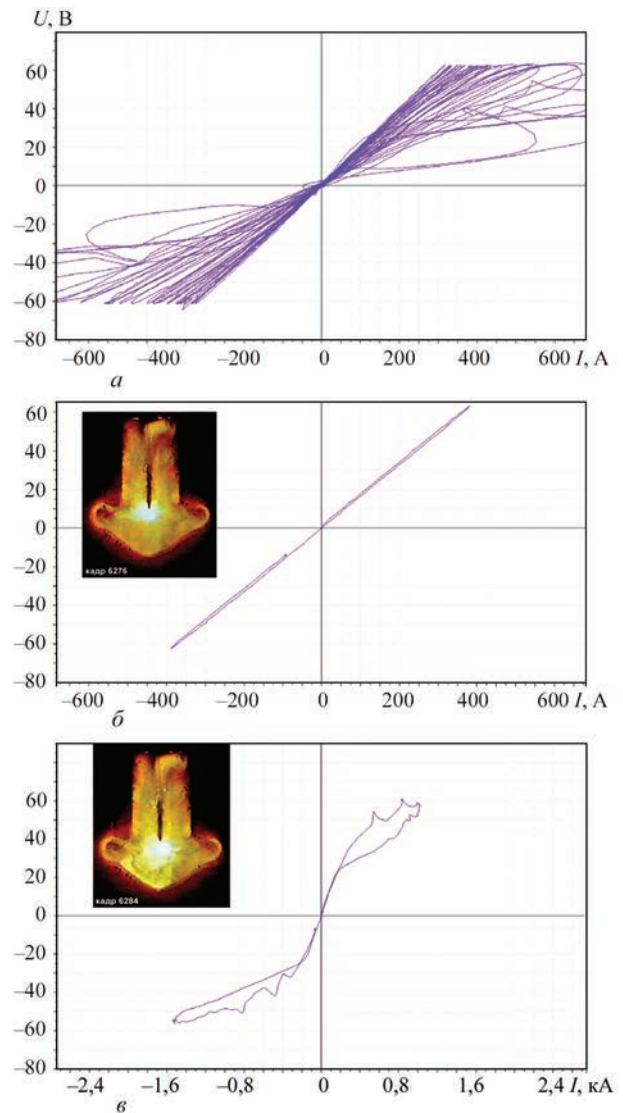


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика цикла длительностью 0,5 с на одном электроде и соответствующие фото зоны сварки: *a* — полного цикла (см. рис. 2, *в*); *б* — начало цикла (0,04 с); *в* — «разряд» в конце цикла (0,04 с)

ная с 0,001 с. Сопоставление осциллограмм сварочного тока с видеокадрами киносъемки в пределах одного цикла позволило проследить динамику формирования «разряда» от начала до конца его существования (рис. 3). Показано, что окончание существования «разряда» и переход его массы в виде электрогидродинамического удара в металлическую ванну характеризуется резким возрастанием сварочного тока (рис. 2, *в*) и тепловой энергии в межэлектродном промежутке.

Сопоставление динамики изменения формы металлической ванны с электрическими параметрами режима показало, что при завершении «разряда» большой мощности масса металлической ванны мгновенно перемещается вниз и достигнув ее дна движется вверх вдоль свариваемых кромок, оплавливая границы зерен основного металла.

Замеры температуры шлаковой ванны вблизи зоны плавления электрода показали, что ее изме-

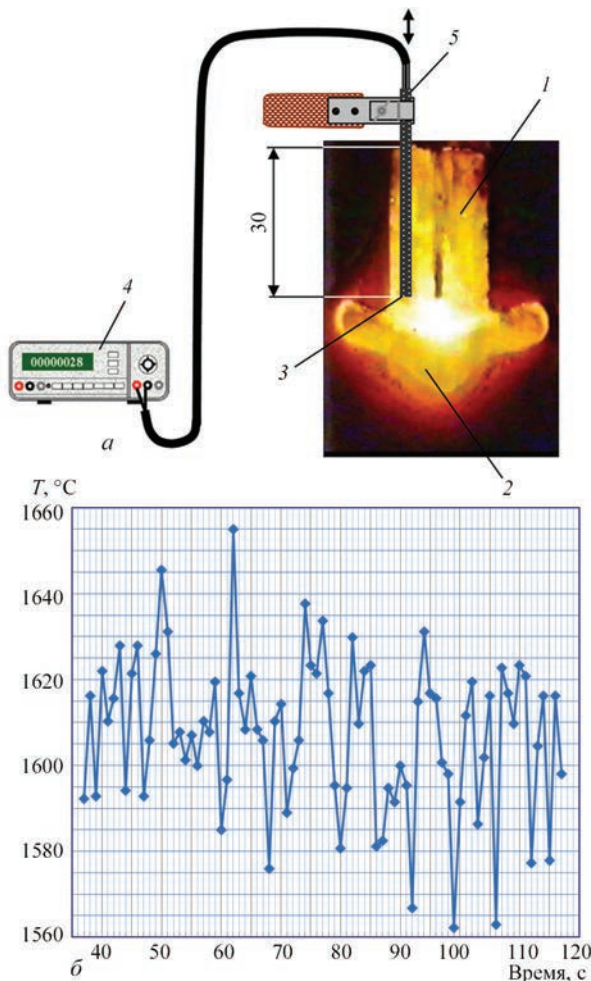


Рис. 4. Схема замеров температуры шлаковой ванны (а) (1 — шлаковая ванна; 2 — металлическая ванна; 3 — место заглубления термодпары; 4 — цифровой вольтметр; 5 — щуп с термодпарой в специальном защитном чехле) и фрагмент изменения ее температуры (б)

нение также носит циклический характер, однако прямой корреляции с циклическими изменениями сварочного тока и размерами ядра не установлено (рис. 4). При этом пики максимальной температуры шлаковой ванны наблюдаются после завершения 3...7 «разрядов» большой мощности. Несмотря на то, что недостаточная разрешающая способность применявшихся приборов не позволила установить корректную взаимосвязь результатов замеров температуры шлаковой ванны с частотой образования «разрядов», можно утверждать, что общая тенденция цикличности изменения температуры соблюдается.

**Выводы**

1. На основании анализа результатов прямых визуальных исследований зоны сварки через оптически прозрачную среду и осциллограмм параметров установившегося режима ЭШС ( $I_c$ ,  $U_c$ ,  $V_{п.п}$ ) подтверждено существование в расплавленном шлаке между электродной проволокой и зеркалом металлической ванны некоего энергетического

ядра, формирующегося под действием электрического потенциала между основным и электродным металлом в зоне сварки.

2. Сопоставительный анализ на качественном уровне динамики изменения геометрических параметров зоны сварки и основных электрических параметров сварочного процесса показал, что размеры энергетического ядра в расплавленном шлаке, значение сварочного тока, количество разрядов и характер изменения формы металлической ванны имеют общую закономерность циклического характера. Причем каждый цикл завершается «разрядом» в металлическую ванну.

3. Для дальнейшего расширения представлений о процессах, протекающих в межэлектродном промежутке при ЭШС проволочным электродом и разработки приемов регулирования тепловложения в основной металл путем управления формой и интенсивностью «разрядов», а также условий существования энергетического ядра, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с обеспечением корректной синхронизации фиксируемых видеоэффектов зоны сварки с результатами регистрации электрических параметров режима.

**Список литературы**

1. Патон Б.Е. (ред.) (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Москва, Mashinostroenie.
2. Волошкевич Г.З. (1955) Рентгенографическое исследование плавания электрода и переноса металла. *Проблемы электродуговой и контактной сварки*. Москва, Mashgiz, сс. 292–300.
3. Волошкевич Г.З. (1958) Плавнение электрода и перенос металла при электрошлаковой сварке. *Автоматическая сварка*, № 1, 14–21.
4. Ando A., Nakata S., Wada H. (1970) Studies on the electroslag welding (report 111). *J. Jap. Weld. Soc.*, 40, 11, 1104–1110.
5. Kaluç E., Taban E., Dhooge A. Elektrocuruf Kayanak Yöntemi ve Endüstriyel Uygulamaları (Electroslag Welding Process And Industrial Applications). *Metal Dünyasi, Ocak 2006 Sayı: 152. Yil:13, Sayfa*, 100–104.
6. Brandt S.D., Liu S., Thomas R.D. (2012) Electroslag and electrogas welding. *AWS Welding handbook*, № 1, 365–379.
7. Kónigsmark J. (1970) Přímá pozorování elektrostruskového procesu při svařování drátovou elektrodou průměru 3,15 mm (Direct observation of electroslag process at welding with wire electrode with diameter of 3.15 mm). *ZVARANIE. XIX*, č. 9–10, 265–269.
8. Дудко Д.А., Волошкевич Г.З., Сушук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. (1971) Исследование электрошлакового процесса с помощью кино-, фотосъемки через прозрачную среду. *Автоматическая сварка*, 2, 15–17.
9. Патон Б.Е., Лычко И.И., Ющенко К.А. и др. (2013) Плавнение электрода и основного металла при электрошлаковой сварке. *Там же*, 7, 33–40.

**References**

1. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Voloshkevich, G.Z. (1955) X-ray investigation of electrode melting and metal transfer. In: *Problems of electric arc and resistance welding*. Moscow, Mashgiz, 292-300 [in Russian].
3. Voloshkevich, G.Z. (1958) Electrode melting and metal transfer in electroslag welding. *Avtomatich. Svarka*, № 1, 14-21 [in Russian].

4. Ando, A., Nakata, S., Wada, H. (1970) Studies on the electroslag welding (Report 111). *J. Jap. Weld. Soc.*, 40(11), 1104-1110.
5. Kaluc, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) *Electroslag welding process and industrial applications*. Metal Dunyasi, Ocak 2006 Sayi: 152, Yil: 13, Sayfa, 100-104 [in Turkish].
6. Brandi, S.D., Liu, S., Thomas, R.D. (2012) Electroslag and electrogas welding. *AWS Welding Handbook*, 6, 365-379.
7. Konigsmark, J. (1970) Direct observation of electroslag process at welding with wire electrode with diameter of 3.15 mm. *Zvaranie*, 19(9), 265-269 [in Slovak].
8. Dudko, D.A., Voloshkevich, G.Z., Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I. (1971) Study of electroslag process using filming and photography through transparent medium. *Avtomatich. Svarka*, 2, 15-17 [in Russian].
9. Paton, B.E., Lychko, I.I., Yushchenko, K.A. et al. (2013) Melting of electrode and base metal in electroslag welding. *The Paton Welding J.*, 7, 31-38.

## ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ТА ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

I.I. Личко, К.А. Ющенко, С.О. Супрун, С.М. Козулін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Викладено результати експериментальних досліджень зв'язку процесів, що протікають в зоні плавлення електродного дроту з електричними параметрами режиму електрошлакового зварювання. Методика виконання експериментів передбачала електрошлакове зварювання зразків зі сталі 09Г2С товщиною 60 мм на режимах, ідентичних режимам, при яких раніше виконували фото- та кінозйомку зони зварювання із застосуванням оптично прозорого середовища. З використанням датчиків Холла модуля АЦП E-140 і програмного забезпечення «Power Graph» здійснювали високошвидкісний запис електричних параметрів режиму (10 тис. записів в с). Одночасно проводили виміри температури шлакової ванни в районі зони плавлення електродного дроту. Виконували аналіз і зіставлення візуальних спостережень зони зварювання через оптично прозору середу з характеристиками режиму електрошлакового зварювання ( $U_c, I_c, V_{н.п}$ ), в результаті чого підтверджено циклічне існування в розплавленому шлаку між електродним дротом і рідким металом якогось ядра, що формується під дією електричного потенціалу між основним і електродним металом. Бібліогр. 9, рис. 4.

*Ключові слова:* електрошлакове зварювання, шлакова ванна, міжелектродний проміжок, швидкісний запис електричних параметрів режиму, активна зона, енергетичне ядро, «розряд», плавлення та перенесення рідкого металу, швидкісна кіно-, фотозйомка

## PECULIARITIES OF ELECTRODE AND BASE METAL MELTING IN ELECTROSLAG WELDING

I.I. Lychko, K.A. Yushchenko, S.A. Suprun, S.M. Kozulin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of experimental studies of the connection between the processes proceeding in the electrode wire melting zone and electric parameters of the mode of electroslag welding are described. The experimental procedure envisaged electroslag welding of samples from 09G2S steel 60 mm thick in modes identical to those, used earlier for photographing and filming the welding zone through an optically transparent medium. Hall sensor, ATSP E-140 module and Power Graph software were applied for high-speed recording of electric parameters of the mode (10 thous. records per second). Measurements of slag pool temperature near the electrode wire melting zone were taken simultaneously. Analysis and comparison of visual observations of the welding zone through an optically transparent medium with the characteristics of electroslag welding mode ( $U_w, I_w, V_w$ ) were performed, confirming the cyclic existence of an energy nugget in the molten slag between the electrode wire and liquid metal, formed under the impact of electric potential between the base and electrode metal. 9 Ref., 4 Fig.

*Keywords:* electroslag welding, slag pool, interelectrode gap, high-speed recoding of electric parameters of the mode, active zone, energy nugget, plasma-type discharge, melting and transfer of liquid metal, high-speed photographing and filming

Поступила в редакцію 15.11.2018



**ООО «Фрониус Украина»  
проводит семинары:**

**15 мая 2019 г. — «Автоматизация сварочных процессов»**

**20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»**

**Контакты:** тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua