

ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

Б. Е. ПАТОН¹, И. И. ЛЫЧКО¹, К. А. ЮЩЕНКО¹, С. А. СУПРУН¹,
С. М. КОЗУЛИН¹, А. А. КЛИМЕНКО²

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе». 40004, г. Сумы, ул. Горького, 58. E-mail: klimenko_@frunze.com.ua

Настоящая статья посвящена вопросам изучения физической природы электрошлаковой сварки путем разработки новых и использования существующих методов исследований процессов сварки плавлением. Изложены результаты изучения процесса электрошлаковой сварки проволочным электродом методом прямых визуальных наблюдений через оптически прозрачную среду явлений, протекающих в свариваемом пространстве, и дальнейшей покадровой обработки материалов скоростной киносъемки. Дан анализ и приведены описания некоторых явлений, наблюдаемых в выбранной базовой ячейке свариваемого пространства: плавление шлака и электрода, образование центрального ядра межэлектродного промежутка в виде шлакометаллогазового разряда плазменного типа, выделение тепловой мощности и ее распространение в свариваемом пространстве, а также численные размеры ее основных геометрических параметров. Полученные уточненные представления о физической природе электрошлакового процесса позволяют более эффективно использовать его преимущества при создании новых технологий и оборудования для производства толстолистовых массивных сварных металлоконструкций. Библиогр. 28, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, свариваемое пространство, шлаковая ванна, межэлектродный промежуток, зона наивысших температур, активная зона, ядро межэлектродного промежутка, шлакометаллогазовый разряд плазменного типа, плавление и перенос жидкого металла, образование шва, скоростная кино-, фотосъемка

С момента изобретения и успешного применения электрошлаковой сварки (ЭШС), которая всегда была объектом пристального внимания ученых, прошло более пятидесяти лет. На начальном этапе технические и экономические преимущества этого способа зачастую предопределяли первоочередность разработки и внедрение аппаратурных и технологических модификаций ЭШС.

Однако первые исследования, выполненные на заре создания ЭШС сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона [1–18] и других научных, производственных предприятиях СССР [19–23], а также зарубежными специалистами [24, 25], позволили теоретически обосновать применение технологических приемов и температурно-временных условий для сварки применительно к различным промышленным конструкциям. В первую очередь следует отметить работы по стабилизации и управлению сварочным процессом [6], автоматическому регулированию уровня металлической ванны [10, 12, 15]. Не менее важными были исследования влияния режимов сварки на качество металла сварного соединения [2], изучение температурного поля и термического цикла, а также теплового баланса процесса сварки [14, 17, 19, 20 и др.].

Сегодня ЭШС востребована в тяжелом машиностроении, особенно при производстве сварных металлоконструкций больших толщин [25–28],

поэтому по-прежнему актуальны вопросы повышения эффективности использования тепловой энергии при плавлении присадочного и основного металла, оптимизации методов контроля и управления ЭШС, а также активизации исследований этого процесса.

Теоретические и практические представления о явлениях, имеющих место при ЭШС (протекающей практически в закрытом, изолированном пространстве), которые были получены ранее, преимущественно базировались на применении приемов косвенного наблюдения [2, 5, 6, 11]. Заглянуть (в прямом смысле этого слова) вовнутрь свариваемого пространства удалось с помощью скоростной кино-, фотосъемки через термостойкую оптически прозрачную среду [18], которая установлена вместо медного формирующего устройства, охлаждаемого водой (рис. 1). Поскольку сварочный ток, проходя через шлаковую ванну, делает ее непрозрачной, увидеть реальную картину плавления электрода и переноса расплавленного металла в металлическую ванну стало возможным лишь при максимальном приближении проволочного электрода непосредственно к поверхности кварцевого стекла. Таким образом, через поверхность прозрачной среды видно плоское изображение (проекцию поперечного сечения) свариваемого пространства, которое расположено



в плоскости движущего электрода, приближенно к стеклу, т. е. наблюдаются процессы плавления и переноса электродного металла в шлаковой ванне. Можно предположить, что подобные процессы будут осуществляться и в зоне плавления второго электрода, закрытого от наблюдения шлаковой ванной. Дальнейшие исследования электрошлакового сварочного процесса проволочным электродом были проведены на основе этой методики, включающей:

1) прямую скоростную кино-, фотосъемку электрошлакового сварочного процесса через оптически прозрачную среду образцов из низколегированной стали марки 09Г2С толщиной 60 мм двумя проволочными электродами диаметром 3 мм при глубине шлаковой ванны 45 мм, сварочном зазоре, равном 27 мм, сухом вылете электродов 70 мм, под флюсом АН-8 (рис. 1). Питание осуществлялось от источника переменного тока типа ТШС-3000/3 с жесткой внешней характеристикой. Сварочный процесс протекал на скоростях подачи проволочных электродов, равных соответственно 3,11 и 4,39 см/с;

2) изучение динамики изменения геометрических размеров основных параметров свариваемого пространства путем компьютерной обработки кадров киносъемки электрошлакового процесса;

3) анализ основных электрических параметров сварочного процесса ($I_{св}$, $U_{св}$, $v_{п.п}$) и температурного режима в свариваемом пространстве. Для этого с сохранением всех условий выполнения ЭШС, зафиксированных ранее при кино-, фотосъемке, провели сварку образца с компьютерной высокочастотной фиксацией $I_{св}$, $U_{св}$, $v_{п.п}$ и измерением температуры шлаковой и металлической ванны;

4) сопоставление данных геометрических параметров свариваемого пространства с основными электрическими параметрами сварочного процесса, а также температурой шлаковой и металлической ванны для установления частотно-временных совпадений импульсного характера переноса электродного металла и изменений сварочного тока.

Ниже представлены результаты визуального исследования свариваемого пространства при ЭШС проволочным электродом (п. 1, 2) в изолированной закрытой зоне, образованной свариваемыми кромками, формирующими устройствами, швом и зеркалом шлаковой ванны, где происходит расплавление электродного и основного металла, а также формирование шва.

Для выбранных условий сварки на один проволочный электрод приходится 30 мм толщины кромок свариваемого металла. Поэтому за оптимальную ячейку на один электрод диаметром 3 мм было выбрано свариваемое пространство, ограниченное размерами $B \times S \times h_s$ (мм), где B — ширина сварочного зазора, равная 27 мм; S — толщина

свариваемого металла, равная 30 мм; h_s — глубина шлаковой ванны, равная 45 мм.

Анализ визуальных наблюдений свариваемого пространства (рис. 2) подтверждает, что в этом наиболее ответственном звене электрической цепи, представляющим сосредоточенное омическое сопротивление, образуется и выделяется основная тепловая энергия, которая затем передается электродному и основному металлу.

В свариваемом пространстве, продольное сечение которого в плоскости оси электрода условно напоминает форму перевернутого «гриба», можно различить отдельные, обычно визуально невидимые в процессе сварки, составляющие (рис. 1, 2): шлаковую ванну, металлическую ванну, линию фронта кристаллизации, шов и проволочный электрод.

При этом практически все параметры свариваемого пространства, обозначенные на рис. 2, взаимосвязаны и непрерывно изменяются во времени. Отчетливо видно, что между двумя твердыми металлическими проводниками (основной металл и проволочный электрод) постоянно существует электрический проводник в жидкой форме. В первом приближении следует отметить, что центральная часть его может быть определена как ядро межэлектродного промежутка. При этом размеры и форма шва главным образом определяются количеством и характером распространения тепла в свариваемом пространстве, причем кромки основного металла оплавляются выше уровня зеркала металлической ванны.

Шлаковая ванна, представляющая собой расплав смеси оксидов, солей, сульфидов и других компонентов, является проводником электрического тока и подчиняется закону Ома. Известно, что в шлаках преобладает ионная проводимость [1, 2, 10]. В общем объеме шлаковой ванны, имеющей по сравнению со свариваемым металлом значительно большее омическое сопротивление вообще и в центральном ядре межэлектродного промежутка, в частности, происходит преобразование электрической энергии в тепловую.

Верхние границы шлаковой ванны четко очерчены зеркалом ее практически плоской поверхности. В зазоре, образованном свариваемыми кромками основного металла, такого разделения между шлаковой и металлической ванной не наблюдается (рис. 2). Шлаковая ванна в своем объеме главным образом, как и следовало ожидать, весьма неоднородна по температуре, о чем свидетельствует ее цветовая гамма (рис. 2). В ней можно выделить характерные участки:

— зону наивысших температур (площадь F_1), которая непосредственно контактирует с торцом электрода, где осуществляется перегрев капель расплавленного электродного металла и шлака;

— более разветвленную область (площадь F_2), которая отличается меньшей температурой, чем площадь F_1 , но выше, чем температура основного объема шлаковой ванны. Этот участок определим как активную зону, где происходит нагрев и оплавление электрода.

Обе эти зоны в свариваемом пространстве занимают определенные и, по-видимому, оптимальные, с точки зрения выделения тепловой энергии и устойчивости процесса сварки, объемы. Наблюдаемые зоны F_1 и F_2 следует рассматривать как продольные сечения соответствующих объемов V_1 и V_2 , близких к телам вращения указанных плоских сечений вокруг оси электрода.

Объем зоны наиболее высоких температур V_1 по сути является центральным ядром межэлектродного промежутка. Очевидно, что ее состав, форма и состояние — важнейшие характеристики электрошлакового процесса. При выбранных параметрах режима сварки ядро (рис. 2) существует на протяжении всей сварки, импульсно изменяясь в объеме по определенным законам. Визуальные наблюдения процесса дают основания полагать, что по своему составу и состоянию объем ядра V_1 представляет собой некий шлакометаллогазовый разряд плазменного типа, который формируется в шлаковой ванне в результате прохождения через нее сварочного тока. Он образуется и существует в импульсном режиме. Наглядно видно, что этот разряд имеет существенно более высокую, чем остальные зоны шлаковой ванны, температуру и как проводник электрического тока подвергается воздействию электромагнитных полей, возникающих в сварочной цепи. Физическое состояние этой зоны (например, температура, проводимость и т. д.) следует и необходимо определять с помощью специальных физических методов исследования, которые применяются при изучении разрядов подобного типа.

На рис. 2 можно проследить, как переменный сварочный ток (например, в первом полупериоде) от электрода передается шлаковой ванне. При этом контактирующая металлическая твердая поверхность электрода может значительно изменяться: от размера, равного поперечному сечению торца электрода ($7,1 \text{ мм}^2$), до значения общей площади боковой поверхности мокрого вылета электрода (около 100 мм^2), которая контактирует (смачивается) и оплавляется шлаком. Поэтому на контактных границах объемов V_1 и V_2 непрерывно изменяется плотность тока и проводимость. Сварочный ток растекается в объемах этих зон, следуя через контактную поверхность с зеркалом металлической ванны и частично через оплавленные свариваемые кромки, расположенные над металлической ванной. От металлической ванны через поверхность фронта кристаллизации и оплавлен-

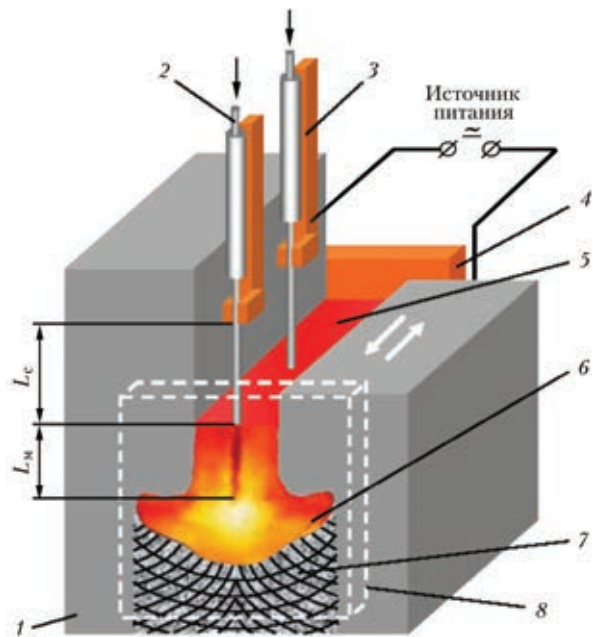


Рис. 1. Схема образца для скоростной кино-, фотосъемки ЭШС через оптически прозрачную среду: 1 — свариваемые кромки; 2 — проволочный электрод; 3 — мундштуки; 4 — формирующее устройство (ползун); 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — шов; 8 — кварцевое стекло (вместо обратного ползуна)

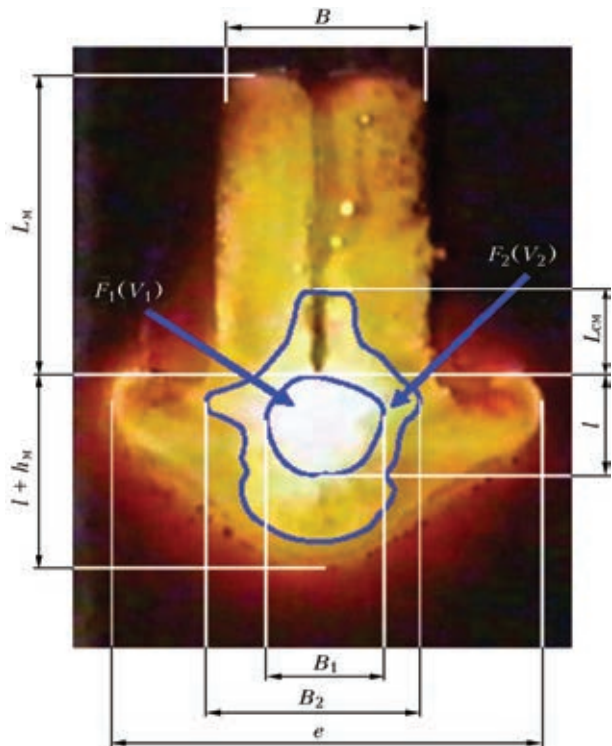


Рис. 2. Схема выделения зон пространства образования сварного соединения ЭШС проволочным электродом, зафиксированных при скоростной кино съемке через оптически прозрачную среду, и их обозначения: L_M — мокрый вылет электрода; L_{CM} — длина смачиваемой части электрода; B — ширина зазора между свариваемыми кромками; e — ширина шва; l — расстояние между концом электрода и зеркалом металлической ванны; h_M — глубина металлической ванны; $F_1(V_1)$ — зона наиболее высоких температур; $F_2(V_2)$ — активная зона; B_1 — ширина зоны наиболее высоких температур; B_2 — ширина активной зоны

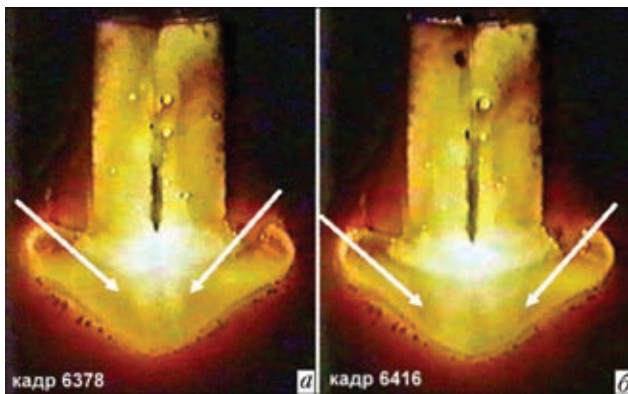


Рис. 3. Постоянно существующий токопроводящий канал (границы канала обозначены стрелками) от зоны F_1 в металлическую ванну, размеры которого определяются ее максимальной шириной B_1 (см. рис. 2)

ные кромки основного металла электрическая цепь замыкается на основной металл и далее к источнику питания. Причем площадь контактной поверхности основного металла равна площади, которая смачивается жидким металлом и шлаком. Она многократно превышает контактную площадь проволочного электрода. Поэтому при смене полярности (второй полупериод) условия прохождения сварочного тока изменяются. Это явление визуально наблюдается чередованием изменения

яркости свечения смежных кадров. При этом по периметру зоны наибольших температур V_1 , соосно электроду, постоянно наблюдается яркий токопроводящий канал, контактирующий с металлической ванной (рис. 3).

При прохождении сварочного тока основная часть тепловой энергии преимущественно выделяется на контактных границах (см. рис. 2): поверхность электрода — область объема V_1 ; поверхность электрода — область объема V_2 ; область объема V_1 — металлическая ванна; область объема V_2 — металлическая ванна; металлическая ванна — основной металл (кромки + шов); шлаковая ванна — кромки основного металла.

Вероятно, при постоянном существовании в межэлектродном промежутке нескольких контактных зон между жидкими проводниками с различными свойствами (например, проводимость, температура, вязкость) создается некая концентрация тепловой энергии, выделяемая в центральном ядре межэлектродного промежутка.

При этом вектор движения тепловой энергии области объема V_1 преимущественно направлен в сторону металлической ванны, поскольку у нее теплопроводность выше, чем у шлака. Основной тепловой импульс шлаковая ванна и свариваемые

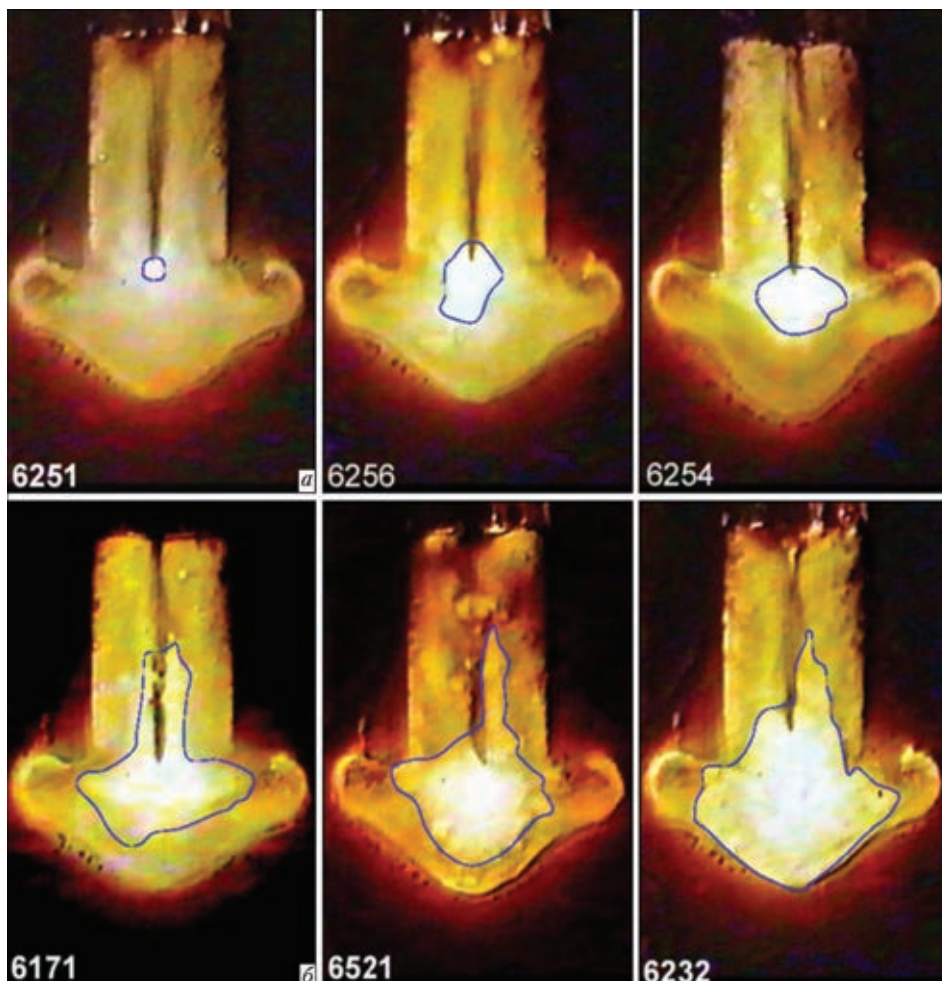


Рис. 4. Схемы выделения зон F_1 (а) и F_2 (б) на отдельных кадрах киносъемки при вычислении их площадей и объемов

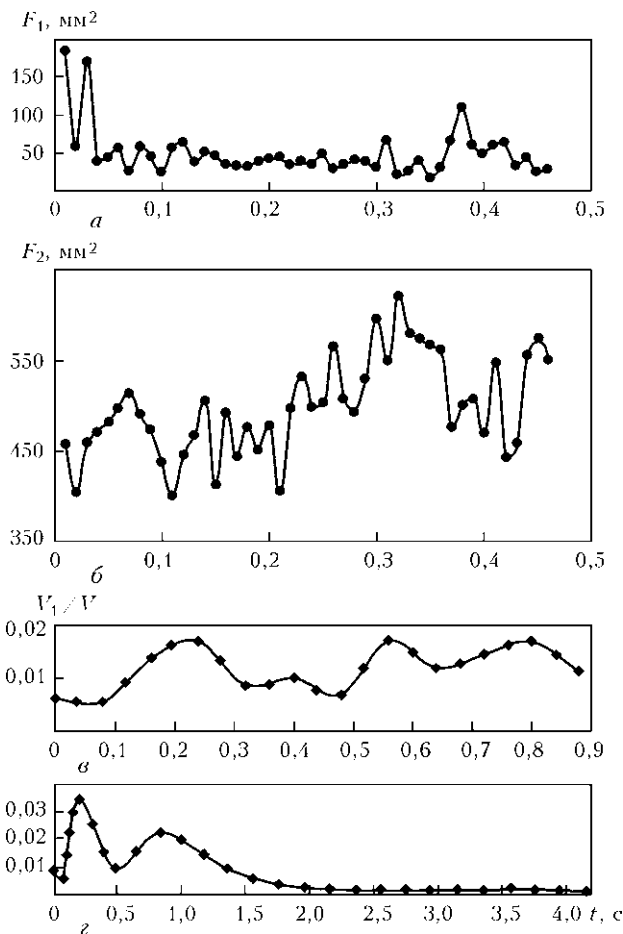


Рис 5. Изменение площадей F_1 (а) и F_2 (б) и доли объема зоны наивысших температур V_1 в общем объеме зоны сварки при $v_{п.п} = 3,11$ (в) и $4,39$ (з) см/с

кромки получают от металлической ванны, как наиболее подвижной среды, формирующейся в свариваемом пространстве. Тепловая энергия, передаваемая шлаковой ванне, расходуется на предварительный подогрев и частичное оплавление свариваемых кромок, мокрого вылета электрода, а также нагрев шлаковой ванны. Кроме того, часть объема шлаковой ванны, расположенная выше активной зоны V_2 , не является проводником сварочного тока, т. е. в основном не выделяет, а потребляет тепловую энергию и обеспечивает равновесное состояние зоны F_1 , а также защиту металлической ванны от воздействия атмосферы.

При определении доли площадей (объемов) зон F_1 и F_2 в общем балансе выбранной ячейки для удобства можно условно разделить их на более простые плоские геометрические фигуры (см. рис. 4) и рассчитать их площади. Как отмечалось ранее, фактически они являются поперечными сечениями тел (объемов) вращения относительно оси электрода, их площади можно перевести в соответствующие объемы. Примеры изменения этих площадей во времени, а также отношение объема V_1 к общему объему выбранной

ячейки свариваемого пространства V приведены на рис. 5.

Для выбранного промежутка времени, например, протяженностью 0,45 с, площадь зоны F_1 (рис. 5, а) может изменяться в широких пределах (от 25,0 до 200,0 мм²), площадь зоны F_2 за такой же промежуток времени изменялась в пределах 350,0...550,0 мм² (рис. 5, б). Доля объема ядра межэлектродного промежутка V_1 к общему объему выбранной ячейки свариваемого пространства V изменяется незначительно (рис. 5, в, з). Эти данные подтверждают, что в объеме зоны наиболее высоких температур V_1 действительно концентрируется основная тепловая энергия, выделяемая при ЭШС.

Металлическая ванна образуется из расплавленного электродного металла, который поступает в нее преимущественно порциями из объема V_1 (зона F_1) и основного металла, оплаваемого по кромкам. Установлено, что при устойчивом протекании электрошлакового процесса наблюдается чередование относительно спокойного характера образования и перемещения массы объема V_1 в металлическую ванну и ее взрывообразного переноса. Взрывообразный характер переноса электродного металла является следствием некоего пульсирующего накопления тепловой энергии в перегретом ядре с последующим взрывообразным разрядом межэлектродного промежутка. В результате при выбранных режимах ЭШС наблюдается локальное опережающее накопление выделяемой тепловой энергии и сравнительно замедленное потребление ее (теплоотвод) кромками основного металла. Это явление существенно влияет на форму межэлектродного промежутка и характер переноса капель. Накопленное тепло ведет к увеличению скорости плавления электрода, вызывая импульсный рост проводимости, и массы объема V_1 , а значит и сварочного тока. Когда под воздействием тепловых и электрических факторов происходит мощный взрывной разряд объема V_1 , уменьшается значение мокрого вылета (возрастает параметр l , см. рис. 2) и, как следствие уменьшается значение силы сварочного тока. После чего общий цикл повторяется и начинается зарождение, формирование и рост нового объема V_1 . Частота образования и объем шлакометаллогазового разряда плазменного типа зависит от выбранных параметров режима сварки. Так, при скорости подачи электрода 4,39 см/с за фиксированный период сварки продолжительностью существования одного разряда, равной 0,15 с, расплавилось 0,24 г массы электрода, а скорость распространения тепловой энергии (волны) в металлической ванне — движение теплового потока массы объема V_1 — составила около 1,5 м/с.

Если металлическая ванна имеет четкую, медленно изменяющуюся границу со швом (по линии



фронта кристаллизации), то между шлаковой ванной и зеркалом металлической ванны в процессе расплавления проволочного электрода и переноса капель, такую устойчивую границу зафиксировать весьма сложно. На протяжении всего электрошлакового процесса зеркало металлической ванны (особенно под электродом) имеет сложную вогнутую конусообразную поверхность, которая непрерывно изменяется (рис. 6, 7). Под влиянием массы объема V_1 и возникающих гидро- и электродинамических сил форма поверхности зеркала металлической ванны непрерывно изменяется. В моменты, когда энергией импульса мощного направленного разряда масса объема V_1 достигает дна металлической ванны (поверхности фронта кристаллизации шва), можно наблюдать «выплескивание» металлической ванны в шлак за пределы равновесного состояния (рис. 7, ε). Вследствие этого, перегретая шлакометаллогазовая смесь вместе с металлической ванной движется вверх по плоскостям, образованным фронтом кристаллизации и формирующими устройствами. Обратно жидкий металл стекает вниз уже под действием сил гравитации. Интенсивная передача тепловой энергии шлаковой ванне и свариваемым кромкам происходит чередующимися импульсами. Тепловой импульс от металлической ванны направлен на оплавленные ранее кромки основного металла под углом около 90° , поэтому передает им максимум энергии. Верхняя же часть кромок в зазоре, контактирующих со шлаковой ванной, выше уровня конца электрода нагревается менее интенсивно и, как правило, не оплавляется шлаком. Поскольку

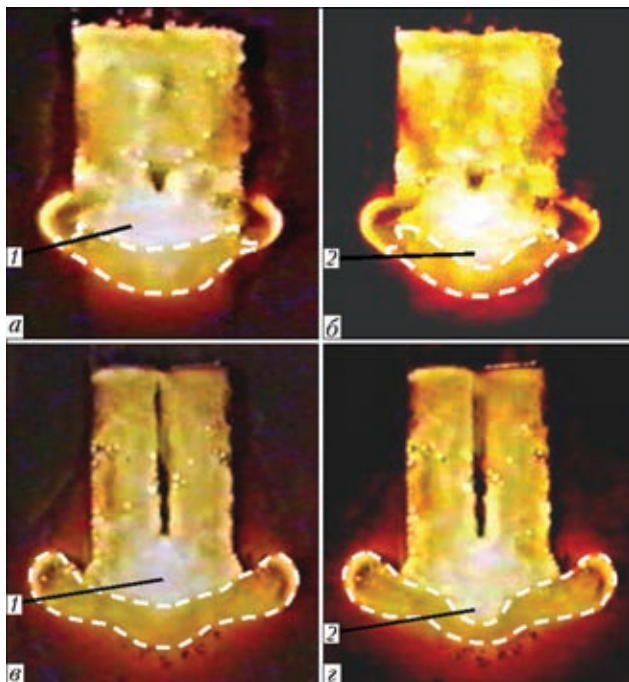


Рис. 6. Динамика изменения формы металлической ванны при $v_{п.п} = 3,11$ см/с в начале ($a, б$) и при установившемся процессе ($в, г$): 1 — образование зоны F_1 ; 2 — взрывоподобное проникновение массы объема V_1 в металлическую ванну

на границе может существовать даже гарнисажная корка, то в основном благодаря этому наблюдается грибовидная форма проплавления кромок.

Линия фронта кристаллизации фактически повторяет форму зеркала металлической ванны. Понятие глубины металлической ванны, обычно устанавливаемое по макрошлифам, не отвечает действительным ее мгновенным параметрам во время протекания электрошлакового процесса (рис. 6, 7). Следует заметить, что периодическое «выплескивание» порций металлической ванны вызывает частичное повторное оплавление закристаллизовавшегося металла шва по фронту кристаллизации.

Наблюдается также интенсивное вращение массы объема V_1 вокруг оси, соосной с электродом. В результате этого тепловые потоки могут отклоняться в сторону от оси электрода. Однако основная доля тепловой энергии концентрируется по оси движения электрода, поэтому поверхность фронта кристаллизации максимально вогнута именно по центру шва.

Расплавление электродного металла главным образом происходит в области активной зоны F_2 . При этом электрод оплавляется по его боковой поверхности, смачиваемой шлаком (контактирующей с активной зоной). Оплавляемая конусо-

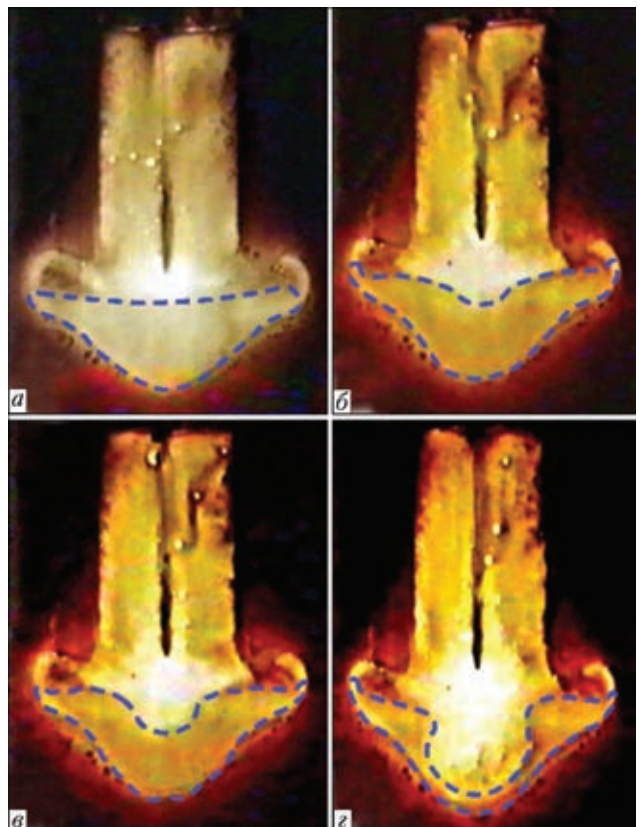


Рис. 7. Изменение формы металлической ванны при $v_{п.п} = 4,39$ см/с в момент (штриховыми линиями очерчены границы металлической ванны) начала зарождения объема V_1 (a), начала «вдавливания» массы объема V_1 в металлическую ванну ($б$), нарастания объема массы V_1 ($в$) и взрыва массы объема V_1 с выдавливанием металлической ванны ($г$)

добная поверхность конца металлического электрода является главным контактным элементом электрической цепи, через который сварочный ток от электрода направляется в шлаковую ванну.

Капля, формируясь из жидкого металла, который стекает по боковой поверхности электрода, находится непосредственно в зоне наивысших температур F_1 , где и происходит ее дополнительный перегрев. Во время образования капли на нее действуют сила тяжести и электродинамические силы («пинч-эффект»), ускоряющие момент отрыва и движения капли от электрода).

Установлено, что форма конца электрода на протяжении сварочного процесса в основном конусообразная (электрод заострен книзу). Однако в момент мощного импульсного взрыва разряда иногда наблюдается кускоподобный обрыв конца конусной части электрода, вследствие чего заметно уменьшается мокрый вылет L и увеличивается расстояние l . Уместно добавить, что в так называемом мокром вылете L , который определяет глубину погружения электрода в шлаковую ванну, следует особо выделить часть, смачиваемую шлаком $L_{см}$ (см. рис. 2), влияющую на сварочный ток и характер плавления электрода.

Для исследуемых условий замечено чередование трех-четырех и более малых разрядов с одним-двумя большими взрывами. Форма оплавления кромок объясняется характером теплопередачи от металлической ванны к основному металлу и частично условиями существования металлической ванны под действием силы тяжести и сил поверхностного натяжения. Контур проплавления кромок представляет собой изотермическую поверхность, соответствующую температуре плавления основного металла. В зоне плавления электродного металла наблюдается интенсивное выделение газов, которые поднимаются вверх практически через весь объем к зеркалу шлаковой ванны (см. рис. 3). Наблюдается выделение газов и в области максимального проплавления кромок основного металла (см. рис 3, кадр 6378), что можно объяснить попаданием газов в металлическую ванну с массой объема V_1 (в момент взрыва). Выделение газов на электроде визуально не отмечено.

При изучении зоны сварки были использованы различные компьютерные программы точного дискретного измерения, с помощью которых определяли значения геометрических параметров, приведенных на рис. 2. Размеры определяли при обработке фрагментов кадров кино съемки, выполненной с частотой 100 кадров в секунду для двух режимов ЭШС — при $v_{п.п} = 3,11$ и $4,39$ см/с соответственно. Определение фактических линейных размеров геометрических параметров выполняли относительно известной фиксированной величины реального сварочного зазора между кро-

Фактические пределы изменения численных размеров основных геометрических параметров для выбранной ячейки свариваемого пространства в зависимости от скорости подачи проволочного электрода

Параметр (см. рис. 2) и размерность	$v_{п.п} = 3,11$ см/с	$v_{п.п} = 4,39$ см/с
$h_{м}$, мм	4,0...10,0	4,0...16,0
$l + h_{м}$, мм	20,0...22,5	20,0...26,8
L , мм	30,5...33,5	30,5...40,5
e , мм	48,0...51,5	54,0...60,0
F_1 , мм ²	100,0...210,0	20,0...200,0
F_2 , мм ²	190,0...550,0	—
B_1 , мм	10,0...22,0	5,0...25,0
B_2 , мм	22,0...28,0	25,0...26,0

ками $B = 27$ мм. Погрешность измерений составляла $0,5...2,5$ %. Для наглядности некоторые результаты измерений (пределы значений параметров) приведены в таблице.

Известно, что основным критерием для оценки качества шва является коэффициент формы шва $\psi = e/h_{м}$. Хотя глубина металлической ванны в процессе сварки постоянно меняется, ширина шва e изменяется незначительно. Площадь сечения металлической ванны может составлять до 30 % площади плоскости сечения свариваемого пространства (по оси электрода), а ее масса для названной ячейки находится в пределах $115...125$ г. Она является главным фактором влияния на форму шва. Для исследуемых режимов сварки средние значения $\psi = 5,7...7,0$.

Выводы

1. При устойчивом процессе ЭШС проволочный электрод оплавляется в шлаковой ванне по поверхности, смачиваемой шлаком. При попадании жидкого электродного металла в промежуток между электродом и зеркалом металлической ванны образуется шлакометаллогазовый разряд плазменного типа, который чередующимися импульсами перегретой массы посредством электро-, гидродинамических ударов переносится в металлическую ванну. Отражаясь от дна, перегретая смесь, включая металлическую ванну, поднимается вверх к свариваемым кромок и передает им, а также шлаковой ванне тепловую энергию.

Взрывной характер переноса и большая подвижность перегретой шлакометаллогазовой смеси обеспечивают грибовидную форму проплавления свариваемых кромок.

2. Установленное в процессе исследований наличие циклически повторяющихся шлакометаллогазовых разрядов плазменного типа является характерной особенностью электрошлакового про-



цесса проволочным электродом на всех стадиях его существования.

3. Шлаковая ванна ЭШС — весьма неоднородная по температуре, о чем свидетельствует зафиксированная ее цветовая гамма, в которой можно выделить характерные участки:

шлакометаллогазовый разряд плазменного типа (объем V_1), который непосредственно контактирует с электродом и имеет наивысшую температуру;

активную зону (объем V_2). По сравнению с V_1 она отличается меньшей, но более высокой, чем температура основного объема шлаковой ванны;

в этих зонах электрическая энергия преобразуется в тепловую, происходит плавление и перенос электродного металла, а также формирование шва;

часть объема шлаковой ванны, расположенного над зоной V_2 , обеспечивает равновесное состояние области V_1 , защиту металлической ванны от воздействия атмосферы и практически не является проводником сварочного тока.

4. Рассмотренные области зоны сварки являются важнейшими элементами электрошлакового процесса и совместно с электрическими параметрами режима сварки используются при управлении и контроле сварочного процесса.

5. Особенности протекания ЭШС проволочным электродом могут быть приняты во внимание при исследовании таких способов сварки, как сварка плавящимся мундштуком, сварка электродом большого сечения, а также электрошлакового переplava.

1. *Электрошлаковая сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Машгиз, 1959. — 410 с.
2. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 512 с.
3. *Волошкевич Г. З.* Метод принудительного формирования и его применение // *Автомат. сварка*. — 1951. — № 1. — С. 3–19.
4. *Волошкевич Г. З.* Электрошлаковая сварка // Там же. — 1953. — № 6. — С. 3–10.
5. *Готальский Ю. Н.* К вопросу о взаимодействии между шлаком и металлом при электрошлаковой сварке // Там же. — 1954. — № 5. — С. 38–43.
6. *Патон Б. Е.* Автоматическое регулирование электрошлаковой сварки // Там же. — 1955. — № 3. — С. 39–50.
7. *Волошкевич Г. З.* Рентгенографическое исследование плавления электрода и переноса металла // *Проблемы электродуговой и контактной сварки*. — М.: Машгиз, 1955. — С. 292–300.

8. *Походня И. К.* Взаимодействие шлака и металла при дуговой и электрошлаковой наплавке высокохромистых ледобуритных сталей // *Автомат. сварка*. — 1955. — № 5. — С. 44–46.
9. *Дудко Д. А., Рублевский И. Н.* Некоторые металлургические особенности процесса электрошлаковой сварки // Там же. — 1956. — № 4. — С. 22–29.
10. *Волошкевич Г. З.* О режимах электрошлаковой сварки // Там же. — 1958. — № 3. — С. 12–17.
11. *Подгаецкий В. В.* О флюсах для электрошлаковой сварки // Там же. — 1956. — № 4. — С. 30–49.
12. *Волошкевич Г. З.* Плавление электрода и перенос металла при электрошлаковой сварке // Там же. — 1958. — № 10. — С. 14–21.
13. *Дудко Д. А., Рублевский И. Н.* Влияние рода тока и полярности на металлургические процессы при электрошлаковой сварке // Там же. — 1958. — № 3. — С. 75–78.
14. *Волошкевич Г. З.* Температурное поле изделия при электрошлаковой сварке // Там же. — 1961. — № 7. — С. 40–45.
15. *Волошкевич Г. З.* Стабилизация электрошлаковой сварки // Там же. — 1962. — № 4. — С. 1–5.
16. *Волошкевич Г. З.* Электрошлаковая сварка // *Доклад-обобщение опубликованных работ на соискание ученой степени доктора технических наук*. — Киев: Изд-во АН УССР, 1962. — 45 с.
17. *Патон Б. Е.* Новый способ электрошлаковой сварки // *Свароч. пр-во*. — 1972. — № 6. — С. 16–17.
18. *Исследование электрошлакового процесса с помощью кино-фото-съемки через прозрачную среду* / Д. А. Дудко, Г. З. Волошкевич, И. И. Сушук-Слюсаренко, И. И. Лычко // *Автомат. сварка*. — 1971. — № 2. — С. 15–17.
19. *Перцовский Г. А.* Определение температуры ванны при электрошлаковом процессе калориметрическим методом // *Сварка: Сб. статей*. — М.: Судпромгиз, 1959. — С. 156–162.
20. *Пугин А. И., Перцовский Г. А.* Расчеты термического цикла околосшовной зоны при электрошлаковой сварке // *Автомат. сварка*. — 1963. — № 6. — С. 14–23.
21. *Кох Б. А.* Термический цикл электрошлаковой сварки // *Свароч. пр-во*. — 1962. — № 1. — С. 1–4.
22. *Шарапов Ю. В.* Температурные поля при электрошлаковой сварке // *Автомат. сварка*. — 1965. — № 6. — С. 32–37.
23. *Шарапов Ю. В.* К расчету зоны проплавления при электрошлаковой сварке // *Свароч. пр-во*. — 1968. — № 6. — С. 13–15.
24. *Электрошлаковая технология за рубежом* / Б. И. Медовар, А. К. Цикуленко, А. Г. Богаченко и др. — Киев: Наук. думка, 1982. — 320 с.
25. *Ando A., Nakata S., Wada H.* Studies on the electroslag welding (report 111) // *J. Jap. Weld. Soc.* — 1970. — **40**, № 11. — P. 1104–1110.
26. *Brandi S. D., Liu S., Thomas R. D.* Electroslag and electrogas welding // *AWS Welding handbook*. — 2012. — Vol. 6A. — P. 365–379.
27. *Electroslag welding: A status report* / B. Paton, D. Dudko, K. Yushchenko et al. // *Welding J.* — 1997. — № 12. — P. 51–58.
28. *Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I.* Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production. — 1999. — **12**, Pt 2. — 108 p. — (Welding and Surfacing Reviews).

Поступила в редакцию 04.04.2013