



УДК 621.791.75.01

Жданов Л.А.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт".
Украина, Киев

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ**
(к формированию физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом)

**ЧАСТЬ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЫ
ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ**

Анотація

Проведено аналіз експериментальних даних, що характеризують реакційну зону при зварюванні під флюсом. Показано, що в залежності від режиму процеси у цій зоні необхідно розділити на два типи: зварювання зануреною дугою і дуговим розрядом, який має зовнішню складову. При цьому змінюється фізико-хімічна схема зварювання і умови взаємодії фаз. Проведена комп'ютерна обробка наявних фотографій показала наявність газів які прориваються з реакційної зони зварювання в районі електрода.

Abstract

Spent assaying of existing schemas of physico-chemical models of electric arc welding under flux the dynamic of their development is shown. The base conflicts are detected and necessity of the multifold assaying of available experimental data on probe of reaction zone of a welding under flux is shown. The generalized physical analog is offered.

Введение

При электродуговой сварке под флюсом реакционная зона закрыта от визуального наблюдения слоем флюса и расплавленного шлака. В результате, прямое наблюдение ее сопряжено с большими проблемами. Выходом при этом могут

служить использование специальных методик, применение просвечивающего излучения и оценка процессов протекающих внутри шлакового купола по косвенным показателям. Понятно, что наиболее достоверные результаты можно получить в случае, когда в результате используемой методики отсутствует нарушение сплошности шлакового купола и непосредственно физической картины сварки под флюсом.

Постановка задачи

В настоящее время имеется достаточно большое количество работ, в которых исследователи тем или иным способом пытались изучать процессы в реакционной зоне при сварке под флюсом [1–12]. Однако обобщения таких работ с целью сопоставления экспериментальных данных с существующими схемами и моделями сварки под флюсом, по нашим данным, проведено не было. Поэтому целью данной работы являлась оценка соответствия физической модели, которая рассматривается как доминирующая, имеющимся литературным данным, характеризующим процесс сварки под флюсом.

Методы исследования реакционной зоны при сварке под флюсом

Основные методы исследования реакционной зоны сварки условно можно разделить на два типа: косвенные и прямые. К косвенным методам

можно отнести осциллографирование дугового разряда, различные способы получения капель и определение формы сварочной ванны. К прямым — скоростное фотографирование. Последний метод имеет явное преимущество, так как позволяет в динамике изучать явления сопровождающие процесс существования фаз при сварке под флюсом, в том числе перемещение капель и дугового разряда в процессе проведения сварки.

Осциллографирование сварочной дуги позволяет при благоприятных условиях определять время существования капель, их размеры, вид переноса электродного металла. Такие исследования были проведены Е.О. Патоном [13], А.Г. Мазелем [14], W.M. Conn [15], Erdmann-Jesnitzer [16]. В тоже время, большая часть данных исследований была выполнена на электронных или шлейфных осциллографах, что определило довольно низкое качество получаемых осциллограмм, особенно с точки зрения возможности их последующего анализа [13–16]. Появившаяся, в последнее время, возможность использования для фиксации дугового разряда компьютерной техники позволяет получить качественно новую информацию о физических процессах сопровождающих появление и существование дугового разряда при сварке [17–22]. Так, например, на основании этих осциллограмм установлен опережающий сдвиг фаз между током и напряжением сопровождающий процесс существования дуги и ее исчезновения при сварке на переменном токе [20, 22].

Однако, наиболее полно, осциллографирование дугового разряда может быть использовано при его совмещении и синхронизации с другими методами исследования реакционной зоны сварки.

Изучение распределения массы или фракционного состава капель позволяет получить определенную информацию о процессах в реакционной зоне при сварке под флюсом. Методы отбора капель при этом изменялись от наплавки на медь или графит с повышенной скоростью [23–25] до прерывания дуги тонкой непроводящей металлической пластинкой [26]. Основным недостатком таких методов являлось изменение тепловых и энергетических условий в реакционной зоне сварки. Поэтому к таким результатам надо относиться довольно осторожно и при их анализе проводить тщательное сравнение с экспериментальными данными, полученными на основе других методик. В то же время, исключение „стадии ванны” из реакционной зоны сварки позволяет получить полезную информацию о „стадии капли”, хотя и пренебрегая изменениями, сопровождающими переход дугового разряда от плавящихся электродов к случаю, когда один из электродов неплавящийся.

Изучение формы сварочной ванны может проводиться двумя способами: мгновенным выплеском ванны на специализированных установках или по изотермам кратера при отсутствии его заплавления, глубине проплавления и высоте усиления шва. В последнем случае по этим трем параметрам геометрическими методами строят поверхность сварочной ванны. По этим данным обычно оценивают влияние режима сварки и физических свойств флюса на геометрические параметры сварочной ванны.

Скоростное фотографирование может быть использовано для фиксации процессов в реакционной зоне при электродуговой сварки под флюсом только при совмещении со специальными методами позволяющими проникнуть в закрытое пространство, ограниченное шлаковым куполом. Из известных методик это: фотографирование через обычное или кварцевое стекло [4], керамическую трубочку расположенную перед дуговым по оси шва [5, 8, 9], путем просвечивания зоны рентгеновским излучением [2, 3, 6, 7]. Считается, что наиболее продуктивным методом является скоростное фотографирование с применением рентгенографии [27], хотя и этот метод имеет определенные недостатки.

В заключении необходимо отметить, что только прямые методы исследования реакционной зоны электродуговой сварки под флюсом дают возможность сформировать уточненную физическую схему на основе которой может быть создана физико-химическая модель позволяющая прогнозировать металлургические процессы сопровождающие образование сварного шва и определяющие его химический состав.

Экспериментальные данные, характеризующие физическую схему электродуговой сварки под флюсом

Анализ приведенных схем и физико-химических моделей сварки под флюсом показывает, что в них имеются существенные противоречия [28]. Так в различных схемах направленность воздействия дугового разряда в продольном сечении изменяется от середины реакционной зоны сварки [24, 29] до передней ее части [30]. Смещение дугового разряда внутри реакционной зоны сварки, по-видимому, привело к гипотезе о нарушении сплошности шлакового купола в передней его части [31–33]. Изменяется, так же, взаиморасположение расплавленного металла и шлака и как следствие условия формирования переднего фронта сварочной ванны. Газовая фаза отождествляется с дуговым разрядом [30] или рассматривается чрезвычайно упрощенно [29, 34]. Это приводит к тому, что процессы в газовой фазе и на ее межфазных границах при создании

физико-химических моделей обычно игнорируются. В то же время, дуговой разряд, существующий в специфических условиях шлакового купола, является основным элементом реакционной зоны сварки определяющим в дальнейшем все остальные параметры взаимодействия сосуществующих фаз. Для выяснения этих противоречий, нами были проанализированы имеющиеся экспериментальные данные о физических процессах в реакционной зоне при сварке под флюсом полученные с помощью рентгенографирования и скоростной фотосъемки, как наиболее достоверного метода исследования [6, 7, 27].

Рентгенографирование процесса электродуговой сварки под флюсом проводилось П.Г. Гребельниковым [3], Н.Г. Остапенко и Б.И. Медоваром [2], И.К. Походней и Б.А. Костенко [6, 7], а также др. [12, 27]. Причем только П.Г. Гребельников и И.К. Походня приводят описание данного процесса основанного на проецировании изображения полученного с помощью рентгеновских лучей на флюоресцирующий экран.

П.Г. Гребельников описывает данный процесс следующим образом: как только возбуждена сварочная дуга и начался процесс сварки, столб дуги изгибается в направлении наплаваемого валика. Процесс сварки имеет характер весьма беспокойного бурления, создается впечатление, что расплавленный электродный металл не падает вниз, а отбрасывается в сторону наплаваемого валика. Основной расплавленный металл выдувается дугой из кратера и смешивается с электродным металлом в конце жидкой ванны, где происходит наиболее сильное бурление. Бурлящая ванна перемещается не плавно по мере движения пластины, на которую наплавается валик, а периодически. Расстояние сварочной ванны от электродной проволоки, по мере протекания процесса сварки, увеличивается до определенного предела, после, чего происходит резкий толчок, и она опять приближается к электроду. Число толчков на единицу длины шва совпадает с количеством чешуек.

На основе динамики перемещения сварочной ванны, автор делает вывод о том, что нижнее активное пятно не плавно перемещается по дну кратера, а рывками. Объясняется это следующим образом: нижнее пятно дуги некоторый промежуток времени находится на одном месте, но по мере удлинения дуги, которое происходит из-за перемещения изделия, происходит скачок, и нижнее основание дуги занимает новое положение в кратере. Установлено, что чем больше скорость сварки, тем чаще происходят такие скачки.

Следующим моментом, на котором автор акцентирует внимание, это зависимость внешней составляющей столба дуги от режима сварки. При

этом отмечается, что определить величину скрытой составляющей не представлялось возможным из-за малой мощности рентгеновской трубки. Установлено, что при напряжении дуги 24–26 В внешняя составляющая дуги равна нулю, то есть столб дуги полностью погружается в кратер. При увеличении напряжения до 40 В внешняя составляющая столба дуги возрастает пропорционально его росту.

Увеличение сварочного тока при неизменном напряжении дуги и скорости сварки влечет за собой уменьшение внешней составляющей дуги.

И.К. Походня и Б.А. Костенко результаты рентгенографирования реакционной зоны сварки под флюсом описывают следующим образом: при сварке на прямой полярности конец электрода не заостряется. Капля на торце электрода сильно деформируется и вытесняется иногда на его боковую поверхность. При больших силах тока имеет место подъем сварочной ванны и захват ею капель электродного металла. В ряде случаев наблюдалось возвращение оторвавшихся капель обратно на электрод. При сварке на обратной полярности короткой дугой (низкое напряжение на дуге) столб дуги несколько наклонен вперед по направлению процесса либо расположен вертикально. Электрод заострен со стороны, противоположной направлению сварки. Капли металла на торце электрода контактируют со шлаком и, достигая определенных размеров, стекают с электрода в сварочную ванну. Перетекание (перелет) капель часто происходит в потоке шлака, без непосредственного контакта со столбом дуги, иногда капли летят внутри пространства, ограниченного флюсовым пузырем. При удлинении дуги столб выравнивается, торец электрода приобретает более округлые формы, что можно объяснить большим блужданием пятна по поверхности электрода.

При сварке на больших токах дуговой промежуток мал. Подвижная сварочная ванна захватывает капли металла на торце электрода, не давая им возможности достигнуть больших размеров. Иногда жидкий электродный металл перетекает в ванну без образования отдельных капель.

Анализ фотографий рентгенограмм процесса сварки представленных авторами работ [2, 3, 6, 7, 12] показывает, что в них имеются существенные отличия:

- по данным работы [2, 3] электрод заострен со стороны совпадающей с направлением сварки, а работы [6, 7] — с противоположной. Это может быть связано с тем, что в работах [6, 7], для возможности четкой фиксации процесса отделения капли использовался разрезной электрод, что могло изменить схему токоподвода к пятну дугового разряда;

- увеличение экспозиции рентгенографии с 0,5 секунды в работе [3] до 0,0001 [6, 7] позволило оценить особенности переноса электродного металла на прямой и обратной полярностях. В работе [3] поведение электродного металла имеется только в описательном варианте и ограничивается направлением движения в сторону "наплавляемого валика";

- установленное в работе [3] дискретное перемещение сварочной ванны (толчки) не нашло своего подтверждения в работах [3, 6, 7], что так же может объясняться разными значениями экспозиции;

- интенсивное бурление сварочной ванны, отмеченное в работе [3], не было зафиксировано в работе [2, 7, 12].

К общим моментам, присутствующим в работах [2, 3, 6, 7, 12] можно отнести:

- заглупление дугового разряда в основной металл при определенных значениях режима сварки и прямую зависимость длины дугового разряда от напряжения. Так, наблюдается уменьшение длины внешней составляющей длины дугового разряда при уменьшении напряжения на дуге и увеличении сварочного тока;

- отсутствие заострения электрода при сварке на прямой полярности [6, 7, 12];

- блуждание сварочной ванны в задней (кратерной) части реакционной зоны;

- наличие шлакового купола (флюсового пузыря) [2, 3, 6, 7].

Рассматривая приведенные в работах [2, 3, 6, 7, 12] рентгенограммы, необходимо отметить, что фотографии работ [6, 7, 12] показывают значительное заглупление дугового разряда в основной металл. В тоже время, сама реакционная зона просматривается недостаточно явно, в отличие от работ [2, 3]. Это объясняется более мощным рентгеновским излучением, которое использовалось в опытах работ. На рентгенограммах работ [2, 3] четко видна внешняя составляющая дугового разряда и сопровождающая его газовая фаза, заглупление дугового разряда в основной металл по рентгенограммам не определяется. Учитывая, что наиболее проблемными с точки зрения физических процессов является газовая фаза, дальнейший анализ реакционной зоны сварки под флюсом базировался на результатах этих работ [2, 3]. Необходимо отметить, что при анализе процессов переноса электродного металла при сварке под флюсом и условий существования металла и шлака целесообразно данные работ [6, 7] сопоставить с результатами осциллографирования этого процесса [13–16], данными полученными при отборе капель из реакционной зоны сварки [23–26] и особенно с результатами U. Franz [10].

Анализ фотографий процесса электродуговой сварки под флюсом

Современные компьютерные технологии позволяют на новом качественном уровне подойти к исходным данным полученным исследователями при фотографировании реакционной зоны сварки с помощью рентгеновского излучения или специальных методов наблюдения. Современные графические пакеты дают возможность с помощью использования разнообразных цифровых фильтров выделить с удовлетворительной точностью интересные области неопределяемые ранее в исходных снимках.

Компьютерная обработка рентгенограмм приведенных в работе [3] показывает, что практически все они, кроме ранее выявленной области, которую традиционно идентифицируют с газовой фазой, имеют еще одну светлую область, соответствующую по яркости газовой фазе. Эта область (рис. 1, 2) располагается параллельно электроду и поднимается вдоль его на величину 3–5 его диаметров. Кроме этого она может распространяться над участком, который автор называет *шлаковым куполом*, обычно в сторону хвостовой части реакционной зоны сварки. Повидимому, наличие такой области свидетельствует о нарушении сплошности шлакового купола возле электрода. Если считать доказанным, что дуговой разряд в реакционной зоне при сварке под флюсом существует между торцом электрода и изделием [35], то светлые области, прилегающие к электроду и распространяющиеся вдоль его поверхности (над зоной воздействия дугового разряда), могут быть только газами, нагретыми до высокой температуры, приближающейся к температуре дугового разряда. Эти газы создают избыточное давление внутри шлакового купола разрывая его в месте, которое соответствует наибольшему объему газов (давлению) образующихся в реакционной зоне сварки. Кроме этого разрыву шлакового купола должно способствовать внешнее механическое воздействие на него, которое проявляется при взаимодействии сварочной проволоки с жидкой прослойкой шлака.

Выделение газов из реакционной зоны в районе электрода подтверждается динамикой развития начала процесса электродуговой сварки под флюсом представленной на модифицированных фотографиях рентгенограмм работы [3]. Вначале процесса сварки (рис. 1, а) дуговой разряд испаряя флюс, основной и электродный металл начинает создавать зону высоконагретых газов которые в дальнейшем образуют газовую фазу. При этом часть газов прорывается наружу в зоне совпадающей с энергетическим воздействием дугового разряда т.е. месте нахождения электрода. В дальнейшем количество газов выделяющихся из

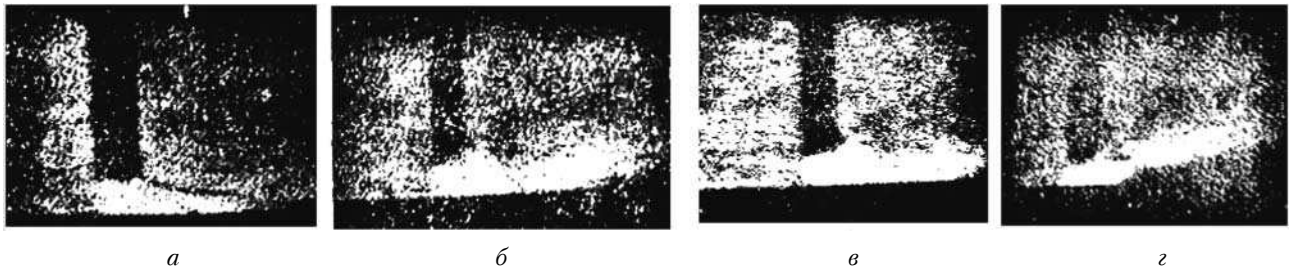


Рис. 1. Фотографии рентгенограмм работы [3] процесса сварки под флюсом в различные моменты времени ($I_{св} = 650$ А, $V_{св} = 18$ м/час) после компьютерной обработки:
a – начало сварки; *б, в* – процесс сварки через 2 и 4 секунды; *г* – установившейся процесс сварки

реакционной зоны сварки увеличиваются (рис. 1, *б, в*) и после установившегося процесса сварки (рис. 1, *г*) можно наблюдать структурированное их распределение. Основная часть газов располагается позади электрода между сварочной ванной и шлаком и составляет газовую фазу. Некоторая часть газов прорывается в передней (головной) части реакционной зоны сварки вдоль оси электрода и хвостовой части. Причем основная часть прорвавшихся газов, обычно выделяется в головной части реакционной зоны сварки (рис. 1, *г; 2, г*).

Над реакционной зоной, также, располагается некоторая светлая область с более низкой интенсивностью свечения (рис. 1, *б, г, 2*), что по видимому соответствует снижению температуры газов, которые поступают из более нагретой зоны.

Отдельного рассмотрения заслуживает влияние режима сварки под флюсом на характер образования реакционной зоны сварки и прилегающих к ней газовых областей (рис. 2). Описание процесса сварки под флюсом [3, 7] показывает, что увеличение напряжения на дуге значительно изменяет условия образования реакционной зоны, а фотографии рентгенограмм [2, 3], что изменяется и сам внешний вид реакционной зоны.

При низком напряжении дуговой разряд погружен в основной металл (рис. 2, *а, б*), что, по видимому, приводит к мощным плазменным потокам, направленным вдоль расплава металла

(рис. 2, *а*). Увеличение скорости сварки ухудшает стабильность дугового разряда, что приводит к расширению плазменной области и зоны воздействия (рис. 2, *б*), что по-видимому снижает объем плазменных потоков (рис. 2, *а, б*).

Близкое по своей физической сущности явление наблюдается при увеличении напряжения. При этом увеличивается "внешняя составляющая" дугового разряда, что приводит к увеличению объема газов, расширению и удлинению реакционной зоны сварки. Присутствует, так же белое свечение вдоль электрода (рис. 2, *в, г*). Дуговой разряд становится менее концентрированным (обжатым), реакционная зона сварки расширяется, что, по-видимому, несколько уменьшает среднюю температуру в ней, о чем свидетельствует появление в ней темных пятен (рис. 2, *в, г*). Понятно, что возможность металлургического воздействия газовой фазы на металл шва при этом увеличивается, так как воздействию подается большая площадь, хотя интенсивность этого воздействия (скорость протекания реакций) должна быть ниже.

В обоих случаях на рентгенограммах наблюдаются газы, которые выделяются из зоны, где дуговой разряд воздействует на основной металл и флюс. При этом газы концентрируются вдоль расплава металла, и частично поднимаются параллельно электроду.

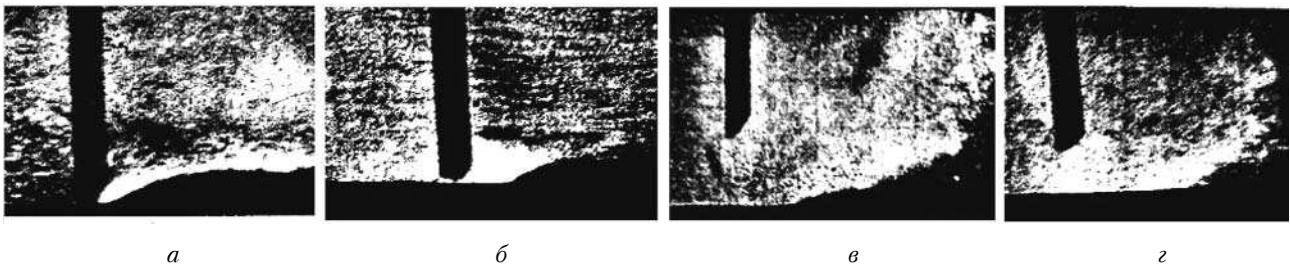


Рис. 2. Фотографии рентгенограмм работы [3] процесса сварки под флюсом после компьютерной обработки на различных режимах:

a – $I_{св} = 600$ А, $U_{д} = 24-26$ В, $V_{св} = 15$ м/час; *б* – $I_{св} = 600$ А, $U_{д} = 24-26$ В, $V_{св} = 40$ м/час;
в – $I_{св} = 800$ А, $U_{д} = 38-40$ В, $V_{св} = 25$ м/час; *г* – $I_{св} = 800$ А, $U_{д} = 38-40$ В, $V_{св} = 40$ м/час

Основное отличие, проведенного анализа фотографий рентгенограмм заключается в том, что в результате компьютерной обработки нами были выявлены светлые области, прилегающие к электроду и распространяющиеся вдоль его поверхности вверх непосредственно над зоной воздействия дугового разряда.

Рентгенограммы И.К. Походни [6, 7], в общем-то, подтверждают этот вывод, хотя газовая фаза обычно видна только как белая подсвеченная область [6]. Однако, уже в работе [7], которая посвящена плавлению электродного металла при сварке под флюсом, довольно четко прослеживается наличие газов подминающихся вдоль поверхности электрода, что подтверждает возможность нарушения сплошности шлакового купола возле электрода.

Анализ фотографий рентгенограмм приведенных в работе [2], после их компьютерной обработки, так же подтверждает наличие светлых областей, которые прилегают к электроду и распространяются вдоль его поверхности вверх непосредственно над зоной воздействия дугового разряда (рис. 3). Однако эти фотографии имеют существенные отличия, в частности флюс выглядит серым фоном. Это объясняется тем, что в основной серии экспериментов использовался

флюс пемзовидного строения (рис. 3), который на снимках выглядит иначе, чем стекловидный (рис. 4, а, б). Кроме этого на фотографиях видны затемненные элементы, которые авторы работы идентифицируют со шлаковым куполом. Однако, сравнение этих фотографий с данными работы [8] показывает, что эти участки могут являться электродным металлом стекающим по стенкам шлакового купола (рис. 4, в, г).

Данные по влиянию режима сварки на характеристики реакционной зоны (рис. 3) полностью совпадают с результатами полученными в работе [3], (рис. 2). Увеличение напряжения на дуге приводит к росту "внешней составляющей" дугового разряда и объема светлой области, которая идентифицируется нами как газы образующиеся в реакционной зоне. Увеличение сварочного тока снижает "внешнюю составляющую" дугового разряда. Наблюдается также неравномерное белое свечение распространяющееся вокруг электрода и светлые области различной интенсивности располагающиеся непосредственно над шлаковой коркой (рис. 3).

Детальный анализ фотографий непосредственного наблюдения реакционной зоны сварки под флюсом через кварцевую трубку расположенную впереди реакционной зоны сварки показывает, что

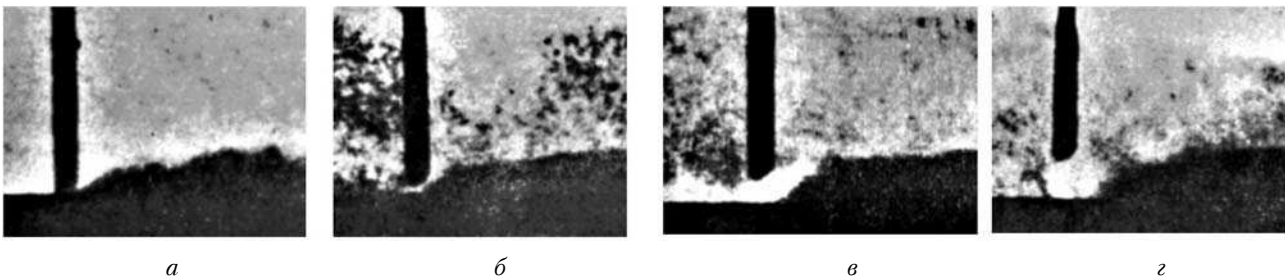


Рис. 3. Фотографии рентгенограмм работы [2] процесса сварки под флюсом после компьютерной обработки при различном напряжении на дуге:

a – $U_d = 25$ В; *б* – $U_d = 30$ В; *в* – $U_d = 38$ В; *г* – $U_d = 48$ В.

Электрод диаметром 5 мм, флюс АН-3, пемзовидной грануляции, $V_{св} = 25$ м/час, $I_{св} = 800$ А

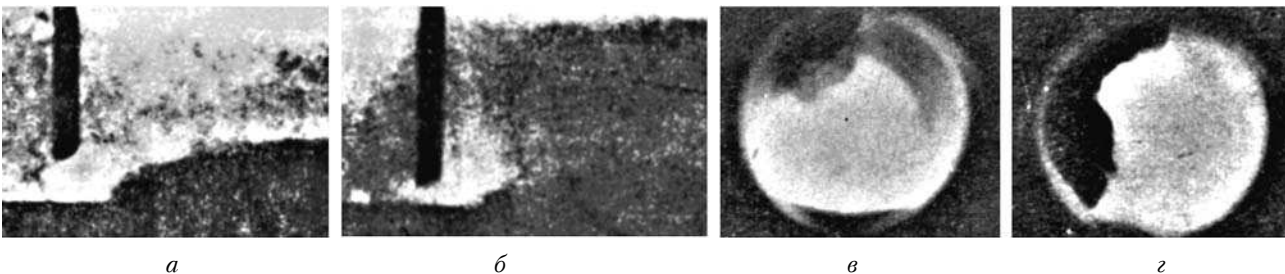


Рис. 4. Фотографии рентгенограмм работы [2] (*a*, *б*) и непосредственного наблюдения реакционной зоны сварки под флюсом через кварцевую трубку [8] (*в*, *г*) после компьютерной обработки при различных условиях:

a – пемзовидный флюс АН-3; *б* – стекловидный флюс ОСЦ-45, режим сварки $U_d = 48$ В, $I_{св} = 800$ А, $V_{св} = 25$ м/час;

в, *г* – различные моменты формирования капли, режим сварки $U_d = 30-31$ В, $I_{св} = 460-470$ А, $V_{св} = 12$ м/час, диаметр электрода 3 мм, флюс Pie 18

все они кроме расплавленного электродного металла имеют затемнение в центральной области снимка. По-видимому, это связано с попаданием частичек флюса непосредственно в плазму дугового разряда. Наличие четкой темно серой области в виде правильного закругленного сегмента на заднем плане реакционной зоны можно сопоставить с элементом шлакового купола в хвостовой части сварочной ванны (рис. 4, в). Ярко светлые области располагаются на этих снимках, в основном по краям сдвигаясь к центру при наличии стекающего металла. Сопоставление этих данных с фотографиями рентгенограмм свидетельствует о динамических процессах которые происходят с дуговым разрядом внутри шлакового купола и, в частности, могут выражаться в наличии плазменных потоков. Кроме этого необходимо отметить, что не на одном из снимков невозможно четко выделить зону существования дугового разряда, хотя его наличие при сварке под флюсом доказано [1, 13] и не вызывает сомнения.

Выводы

На основании анализа существующих методов исследования реакционной зоны сварки под флюсом показано, что наиболее достоверным способом ее изучения являются прямые методы исследования сопровождающиеся скоростным фотографированием. К таким методам относятся рентгенографирование внутренней области шлакового купола и изучение его при помощи специальных средств его вскрытия. Определенные сведения можно получить на основе косвенных данных по осциллографированию дугового разряда, фракционному составу капель и форме сварочной ванны. Однако, полученные результаты должны тщательно проверяться и сопоставляться с данными прямых исследований.

Приведенное в литературе описание состояния реакционной зоны при сварке под флюсом полученное с помощью прямых методов исследования показывает, что эти процессы внутри зоны носят динамический характер, имеющий определенные повторяющиеся моменты. Зафиксировано периодическое перемещение сварочной ванны в задней (кратерной) части реакционной зоны, наличие изменяющейся в объеме белой области, которая нами была идентифицирована как газовая фаза с прорывающимися наружу газами и взаимосвязанные с этими процессами особенности переноса электродного металла. При этом перенос электродного металла может осуществляться каплями в потоке шлака или внутри пространства ограниченного шлаком, захватом капель с торца электрода сварочной ванной и перетеканием в ванну без образования отдельных капель.

Сопоставление фотографий рентгенограмм с данными характеризующими реакционную зону при вскрытии шлакового купола в процессе сварки показывает, что затемненные области в головной части наблюдаемой зоны, которые традиционно идентифицируются со шлаковым куполом могут являются каплями стекающими в сварочную ванну.

Показано, что существует зависимость между режимом сварки и размерами реакционной зоны, а так же особенностями ее существования. При низком напряжении дуговой разряд погружен в основной металл, подобное явление наблюдается при увеличении сварочного тока. Увеличение напряжения и уменьшение сварочного тока приводят к возрастанию "внешней составляющей" дугового разряда. Это дает основание разделить процесс сварки под флюсом на два типа, в которых изменяются условия взаимодействия металлической, шлаковой и газовой фаз и сама физико-химическая модель сварки под флюсом.

На основании компьютерной обработки фотографий показано, что в реакционной зоне сварки практически всегда наблюдается разрыв шлакового купола в месте соответствующем расположению электрода с выделением газов, которые в дальнейшем распространяются параллельно электроду и над поверхностью реакционной зоны.

Приведенные данные позволяют сформировать уточненную физико-химическую модель сварки под флюсом, которая должна быть разделена на два типа: сварка погруженной дугой и дуговым разрядом имеющим внешнюю составляющую. Выбор типа модели в каждом конкретном случае зависит от режима сварки, физических характеристик флюса и состава электродной проволоки. При этом модель должна включать три основные фазы: газовую, металлическую и шлаковую. Каждую из фаз необходимо структурировать по температурному градиенту и условиям взаимодействия.

Литература

1. Б.Е. Патон, А.М. Макара. Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса. — Киев: АН УССР, 1944. — 93 с.
2. Н.Г. Остапенко, Б.И. Медовар. Исследование дуги, горячей под флюсом, с помощью рентгеновских лучей, "Автогенное дело" № 11, 1947 — С. 16—20.
3. П.Г. Гребельник. Рентгеноисследование процесса автоматической сварки под флюсом. "Автоматическая сварка", 1950. — № 6. — С. 18—29.
4. G. Tybus. Farbige Zeitlupenaufnahmen zur Beobachtung des Schweißbades beim UP-Schweißen. "Schweissentechnik", Berlin, 1957. — № 3.

5. Franz U. Vorgänge in der Kaverne beim UP – Schweißen Metallurgie der Schmelzschweißverfahren, – 4 Internationales Kolloquium. DDR. Magdeburg, 1964.
6. И.К. Походня. Метод исследования процесса плавления и переноса электродного металла при сварке. "Автоматическая сварка", 1964. – № 2.
7. И.К. Походня, Б.А. Костенко. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом. "Автоматическая сварка", 1965. – № 10.
8. Franz U. Vorgänge in der Kaverne beim UP – Schweißen Teil 1 – Schweißtechnik, 1965. – № 15.
9. Franz U. Der Werkstoffübergang und sein Einfluss auf die Metallurgie bei der UP-Schweißung. Die Arbeiten der V-ten Konferenz für Schweißtechnik und Metallprüfung. Timisoara, 1965.
10. Franz U. Vorgänge in der Kaverne beim UP-Schweißen Teil 2 -Schweißtechnik, 1966. – № 16.
11. Franz U. Werkstoffübergang beim UP-Paralleldrahtschweißen – Schweißtechnik, 1966. – № 19.
12. Л.А. Гобарев, А.Г. Мазель, И.А. Шемелева, К.К. Хренов. Исследование сварочной дуги, горячей под флюсом с помощью импульсного рентгеновского аппарата. "Автоматическая сварка", 1973. – № 2. – С. 69–70.
13. Патон Е.О. Автоматическая электродуговая сварка. Киев–Москва: Машгиз, 1953. – 369 с.
14. А.Г. Мазель, Е.М. Рогова, Ю.И. Мерченко. Об оценке переноса металла в дуге при ручной сварке по осциллограммам тока и напряжения. Сварочное производство, 1957. – № 12 – С. 9–11.
15. Conn W.M. Die technische Physik der Lichtbogenschweißung Springer Verlag, Berlin - Gottingen-Heidelberg, 1959.
16. Erdmann-Jesnitzer F., Feustel E. and Rehfeld D., Impulsgerät zur Tropfenanalyse beim Lichtbogen-Schweißen. Schweißen und Schneiden, 18, 1966, 5, 226–229.
17. Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик та інші. Можливість використання аналогово-цифрового перетворювача для дослідження зварювальної дуги змінного струму. "Машинознавство", 2003. – № 2. – С. 38–41.
18. Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик и др. Исследование сварочной дуги переменного тока с помощью аналого-цифрового преобразователя. Всероссийская научно-техническая конференция "Компьютерные технологии в соединении материалов" Тула: ТулГУ, 2003. – С. 55–56.
19. Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик и др. Программное обеспечение для анализа дуговых процессов переменного тока. "Сварщик", 2004. – № 1. – С. 36.
20. Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик та інші. Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп'ютера. Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2004. – № 3. – С. 49–55.
21. Л.А. Жданов, В.Л. Коваленко, В.Т. Котик, К.О. Зворыкин. Технические системы записи параметров дуговых процессов на переменном токе. "Технологические системы", 2005. – № 2. – С. 65–70.
22. Л.А. Жданов, В.Л. Коваленко, К.О. Зворыкин. Расшифровка компьютерных осциллограмм при электродуговой сварке под флюсом на переменном токе. – Технологические системы, 2005. – № 5–6. – С. 63–66.
23. Б.Е. Патон. О размере электродных капель при сварке под флюсом. – Автомат. сварка, 1950. – № 4. – С. 45–48.
24. Автоматическая электродуговая сварка./ Под ред. Е.О. Патона. – М.: Машгиз, 1953. – 396 с.
25. И.И. Фрумин. Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1961. – 422 с.
26. Larson L.J. An exploration of a modern welding arc. The Weld. J., 15, October 1936, 10 14–20.
27. Eichhorn F., Dilthey U. High-speed X-ray photography for submerged arc welding. Metal construction and British Welding Journal, 1971. – v 3. – № 12. – P. 453–456.
28. Л.А. Жданов. Современные представления о физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом. Часть 1. Существующие схемы электродуговой сварки под флюсом. Технологические системы, 2007. – № 4. – С. 75–86.
29. Г.Л. Петров. Сварочные материалы. – Л.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
30. А.А. Буки. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. М.: Машиностроение, 1991. – 287 с.
31. В.Г. Кузьменко. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом// Автомат. сварка, 1998. – № 3. – С. 14–19.
32. В.Г. Кузьменко. Оценка роли шлаков в различных сварочных ваннах при электродуговой сварке под флюсом //Автоматическая сварка, 1998. – № 12. – С. 11–21.
33. В.Г. Кузьменко. К особенностям плавления флюса при сварке// Автомат. сварка, 2000. – № 11. – С. 60.
34. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие: В 2-х т. Т.1. Защитные газы и сварочные флюсы. Под ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
35. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.