



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 3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЫ
ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ****Анотація**

На основі аналізу існуючих схем і фізико-хімічних моделей зварювання та наплавлення під флюсом та експериментальних даних по прямому вивченню реакційної зони сформульовано принципи створення інтегрованої моделі. Визначено особливості взаємодії фаз і розрахунків металургійних процесів відповідно до існуючого у реакційній зоні зварювання градієнту температур. Наведена структурна схема взаємодії фаз у поперечному та подовжньому перерізі. На основі комп'ютерної реконструкції фотографій рентгенограм створені об'ємні моделі, що відповідають процесу зварювання на різноманітних режимах зварювання. Запропонована уточнена фізико-хімічна модель зварювання під флюсом, яка на основі інтеграції експериментальних даних у існуючі моделі дозволяє пояснити процеси, що відбуваються у реакційній зоні зварювання.

Abstract

On the basis of the assaying of existing schemes, physico-chemical sample pieces of a welding and a building-up welding under a flux and experimental data on direct study of reaction zone of a welding principles of creation of the integrated sample piece are formulated. Habits of interacting of phases and calculations of metallurgical processes which will match existing in reaction zone of a welding a gradient of temperatures are determined. The block diagram of interacting of phases in cross-sectional and longitudinal section is adduced. On the basis of computer renovation of photos of roentgenograms volumetric sample pieces which answer process of a welding on different welding conditions and building-up weldings. The updated physico-chemical sample piece of a welding under a flux which on the basis of integration of experimental data in existing sample pieces allows to explain processes which occur in reaction zone of welding together is offered.

Введение

Объемы применения электродуговой сварки и наплавки под флюсом в последнее время приобрели тенденцию к планомерному росту. В то же время, создание новых материалов и технологий для этого способа сдерживается наличием четкого понимания физических процессов сопровождающих формирование конечного состава металла шва. В результате отсутствует возможность определения направления окислительно-восстановительных процессов, создания условий и критериев для программируемого управления изменением концентрации легирующих элементов в процессе сварки и как следствие возможность прогнозирования конечного химического состава металла шва. Результатом этого подхода является эмпирический метод, реализуемый при разработке сварочных материалов, который в частности, выражается в создании регрессионных моделей различного уровня показывающих зависимость состава металла шва от присадочных материалов [1–6]. Понятно, что в этом случае может быть охарактеризовано только использование определенных композиций сварочный шлак-проволока в рамках изучаемого диапазона режимов сварки или наплавки.

В результате, несовершенства физико-химической модели процесса электродуговой сварки под флюсом невозможно охарактеризовать все многообразие и взаимозависимость процессов в реакционной зоне сварки, что приводит к существенному сдерживанию дальнейшего развития этого способа сварки.

Постановка задачи

Существующие в настоящее время схемы и физико-химические модели сварки и наплавки под флюсом имеют явные расхождения с экспериментальными данными по изучению реакционной зоны сварки с помощью специальных методов обычно заключающихся в рентгенографии или локальном вскрытии шлакового купола с помощью специальных методик [7]. В результате они

не отражают в полной мере многообразие процесса сварки под флюсом [8]. Проведенный анализ различных схем и моделей позволил выявить основные элементы, противоречащие экспериментальным данным и существующим представлениям о физико-химических процессах в реакционной зоне сварки. Эти противоречия заключаются, прежде всего, в неоднозначности определения взаиморасположения газовой, шлаковой и металлической фаз в реакционной зоне, роли газовой фазы при формировании конечного состава металла шва и главное, условий существования шлакового купола [8–12]. Исходя из этого актуальной задачей является создание уточненной физико-химической модели сварки под флюсом, которая согласуется и может объяснить имеющиеся в литературе экспериментальные данные по прямому изучению этой зоны.

Следующей задачей должно быть обобщение экспериментальных данных по характеристикам переноса электродного металла в зависимости от параметров режима и характеристик флюса и увязка этих данных с предлагаемой уточненной моделью взаимодействия фаз в реакционной зоне.

Принципы создания интегрированной физической модели электродуговой сварки и наплавки под флюсом

Особенностью способа электродуговой сварки и наплавки под флюсом является то, что, реакционная зона закрыта от визуального наблюдения слоем флюса и расплавленного шлака. Попытки использования специальных, прямых методик, для ее изучения заключающихся в применение просвечивающего (рентгеновского) излучения или механизмов вскрытия шлакового купола (применение кварцевого стекла, керамической трубки), а так же косвенных методов (осциллографирования дугового разряда, определения фракционного состава капель, формы сварочной ванны и т.д.) для оценки процессов протекающих внутри шлакового купола показали, что такими методами можно выявить особенности переноса электродного металла в зависимости от режима, проплавления основного металла (при достаточной мощности рентгеновского излучения) и наличие газов в реакционной зоне и вокруг нее. При этом сам дуговой разряд на снимках не идентифицируется, а газовая фаза выглядит как область белого цвета [7].

В общем случае можно утверждать, что при электродуговой сварке (наплавке) под флюсом в реакционной зоне сварки присутствует три фазы: металлическая, шлаковая и газовая. Причем каждая из фаз из-за наличия большого градиента температур внутри зоны изменяет свои физико-химические свойства в зависимости от того на каком участке рассматриваются условия взаимо-

действия. Понятно, что в конечном итоге исследователей интересует завершающее влияние состава присадочных материалов и режима сварки на окончательные характеристики металла шва. Однако, прогнозирование их невозможно без учета процессов протекающих в каждом участке реакционной зоны.

Попытки изучить реакционную зону сварки под флюсом с помощью специальных экспериментальных методов показали, что в зависимости от режима сварки, а также структуры флюса (стекловидный или пемзовидный) геометрические характеристики этой зоны принципиально изменяются. Результаты классификации экспериментальных данных привели к разделению схемы сварки под флюсом на два процесса: сварка погруженной дугой и сварка дугой имеющей внешнюю составляющую [7]. Понятно, что при этом кардинально изменяются условия теплообмена, взаимодействия фаз и кинетические условия переноса электродного металла.

Отдельного рассмотрения заслуживает распределение температурного градиента внутри реакционной зоны в продольном направлении. Связано это с тем, что в поперечном направлении распределение температур может быть принято равномерным и в первом приближении вокруг реакционной зоны сварки может быть рассчитано с помощью уравнений теплопроводности [13]. На этой основе принципиально возможно определить границы металлической ванны, особенно для случая проведения наплавки на массивное тело. В зоне, которая идентифицируется с внутренними составляющими шлакового купола использование уравнений, основанных на принципах теплопроводности, не позволяют получить адекватных расчетных результатов [14].

Интенсивность изменения теплового потока по радиусу пятна дуги, пытаются описывать нормальным законом распределения функции вероятности Гаусса [15]:

$$q_2(r) = q_{2max} \times \exp(-k \times r^2) \quad (1)$$

где, q_{2max} — наибольший удельный тепловой поток в центре пятна; k — коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока дуги см^{-2} ; r — расстояние от оси источника в см.

Считается, что с повышением тока при постоянном напряжении дуги q_{2max} увеличивается. С повышением напряжения при неизменном токе q_{2max} — уменьшается и распределение удельного теплового потока становится менее рассредоточенным, что вполне логично. Отмечается, что тепловой поток электрической дуги под флюсом значительно более сосредоточен, чем открытой дуги [15]. Основной проблемой является вычисление q_{2max} и определение коэффициента

сосредоточенности удельного теплового потока дуги (k). В результате, при создании модели дугового разряда с использованием выражения (1), мы получаем симметричную объемную фигуру [15].

Однако, при сварке и наплавке под флюсом распределение температурного поля характеризующего изменение градиента температур в продольном и поперечном направлениях различно. Связано это с физическими особенностями этого способа сварки, о чем свидетельствуют фотографии рентгенограмм [16–19] и их компьютерная обработка [7, 8]. В результате структурная схема реакционной зоны сварки под флюсом, так же должна рассматриваться отдельно в продольном и поперечном сечениях (рис. 1).

Из приведенной схемы (рис. 1) четко видно, что условия взаимодействия фаз в продольном и поперечном сечениях реакционной зоны сварки кардинально отличаются. В поперечном направлении – это симметричная схема взаимодействия, а в продольном – ассиметричная. Условия взаимодействия фаз напрямую связаны с тепловыми потоками в реакционной зоне сварки. Именно продольная составляющая изменения теплового потока определяет основные отличия сварки под флюсом от других способов электродуговой сварки и в конечном итоге оказывает определяющее влияние на конечный состав металла шва. Это показывает необходимость, при анализе физико-химических процессов, разделения реакционной зоны сварки в соответствии с градиентом температур, прежде всего, в продольном направлении.

Следующим моментом, который вытекает из приведенной структурной схемы, является то, что взаимодействующие три фазы, существующие в реакционной зоне сварки и наплавки под флюсом, имеют общие межфазные границы, через которые и происходит их химическое взаимодействие. Активность этого взаимодействия напрямую связана с температурными и концентрационными условиями на межфазных границах и их геометрическими размерами. На практике, все эти параметры, в первом приближении, могут быть определены из литературных источников описывающих экспериментальные исследования реакционной зоны сварки [20–22].

Рассмотрим более подробно условия взаимодействия металлической, шлаковой и газовой фазы приняв, что основополагающим элементом такого взаимодействия является газовая фаза, как наиболее высокотемпературная.

Теоретически и экспериментально геометрические размеры газовой фазы определить довольно сложно. Связано это со следующими факторами:

- в настоящее время, не существует единой теплофизической модели образования шлакового купола;
- при экспериментальных исследованиях на фотографиях рентгенограмм отсутствует четкая область ограничивающей область ее существования [7, 16–19].

Возможность теоретических расчетов объема жидкого шлака в куполе при электродуговой сварке и наплавке под флюсом ограничено, также большим разбросом данных по коэффициенту тепло-

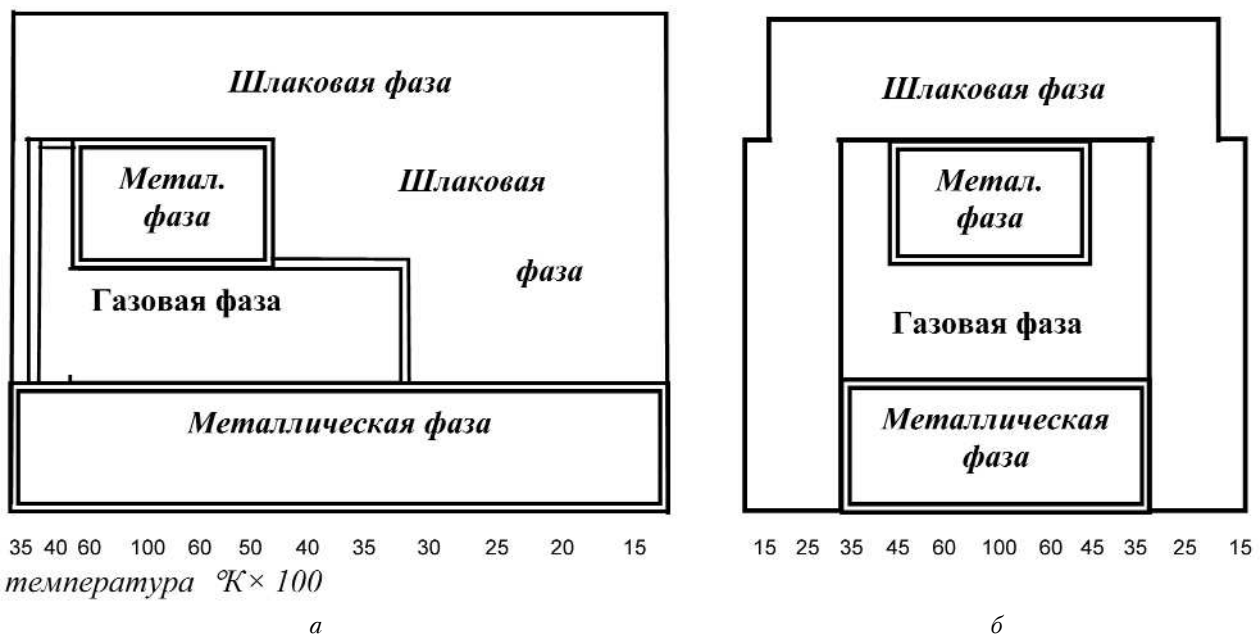


Рис. 1. Структурная схема сварки под флюсом в продольном (а) и поперечном (б) сечениях (двойными линиями обозначены основные межфазные границы)

проводности шлака ($\lambda_{ш}$), который, исходя из литературных данных может изменяться в 100 раз, в зависимости от состава флюса и главное от скорости его перемешивания [23, 24].

Если исходить из традиционной модели существования реакционной зоны при сварке и наплавке под флюсом, то размеры газовой фазы ограничиваются шлаковым куполом и включают межфазные поверхности, контактирующие с газом на стадии металла капли и ванны, а так же шлака. Границы межфазных поверхностей можно попытаться определить по фотографиям рентгенограмм. Их компьютерная обработка, проведенная в работе [7] показывает, что газовая фаза при электродуговой сварке под флюсом имеет две составляющие внутреннюю и внешнюю. Геометрические размеры шлакового купола могут быть определены исходя из размеров внутренней составляющей газовой фазы, которая на фотографиях идентифицируется как белая область ограниченная снизу основным металлом, сверху — торцом электрода и прилегающими к нему темными фрагментами, которые на некоторых снимках выглядят как элементы шлакового купола, хотя могут являться электродным металлом стекающим по его стенкам. Именно сопоставление этих локальных темных и светлых областей дает возможность ориентировочно определить размеры шлакового купола и как частный случай — поверхность взаимодействия части внутренней области газовой фазы со шлаком и объем газовой фазы.

Проведенные нами попытки построения такой кривой показали, что наилучшие результаты дает использование в качестве параметрической кривой — участка полинома 5–6 порядка. По полученной кривой описывающей межфазную границу газ-шлак можно найти полный объем внутренней составляющей газовой фазы и в дальнейшем рассчитать приведенные объемные мольные концентрации элементов в ней.

В результате в предлагаемую модель реакционной зоны при сварке под флюсом нами были заложены следующие физические принципы:

- ключевым элементом реакционной зоны сварки является газовая фаза, основным элементом которой является плазма дугового разряда;
- в реакционной зоне сварки присутствует три фазы: металлическая, шлаковая и газовая, которые формируют гетерогенную закрытую термодинамическую систему;
- существующие фазы могут быть разделены по физическим свойствам;
- отдельно должны быть выделены межфазные границы, через которые происходит процесс взаимодействия газа, металла и шлака, т.е. внутренняя область реакционной зоны сварки является открытой термодинамической системой;

- каждая фаза имеет свой внутренний градиент температур и может быть разделена на зоны по этому градиенту;

Исходя из этих принципов и сформированной структурной схемой реакционной зоны сварки и наплавки под флюсом, в которой основным элементом принята газовая фаза, выполним построение физической модели. Основой для построения физической (визуальной) модели должны служить результаты рентгенограмм.

Особенности взаимодействия фаз при сварке и наплавке под флюсом и принципы проведения расчетов металлургических процессов

Условия взаимодействия в реакционной зоне сварки и наплавки необходимо рассматривать с учетом особенностей существования этой зоны в продольном и поперечном сечениях и предложенных принципов формирования физической модели реакционной зоны сварки и наплавки под флюсом.

Учитывая, что основным элементом реакционной зоны сварки принята газовая фаза и то, что каждая фаза имеет свой внутренний градиент температур и может быть разделена на зоны по этому градиенту, внутренняя составляющая газовой фазы должна быть разбита на два элемента: плазму дугового разряда и неионизированный газ, где происходят химические реакции, определяющие в дальнейшем химический состав металла шва.

В "головной" части реакционной зоны сварки, где из-за наличия дугового разряда, температура максимальная, соответственно возможно не просто испарение сварочных материалов и основного металла, но и их сублимация. В дальнейшем эти парообразные компоненты проходят через дуговой разряд, определяя физические свойства плазмы, и попадают в "хвостовую" часть реакционной зоны сварки (неионизированный газ), где происходят обратные реакции по образованию молекул с параллельным взаимодействием этих продуктов реакций между собой и другими компонентами газовой фазы. Именно эти процессы во многом определяют окончательный состав металла шва и содержание в нем кислорода. Связано это с повышенным градиентом температур на межфазных границах газ-металл и газ-шлак. Наличие этого градиента определяет необходимость использования принципов неравновесной термодинамики для расчета конечного состава металла шва, в частности определения феноменологических коэффициентов. В результате процессы, происходящие в "хвостовой" части сварочной ванны, с точки зрения равновесной термодинамики, могут рассматриваться, как обратные, т.е. процессы образования молекул — как обратные термической диссоциации, а конденсации — испарения.



На основе термодинамических расчетов процессов термической диссоциации можно вычислить парциальное давление каждого компонента газовой фазы исходя из состояния равновесия общих участников параллельно протекающих реакций. В то же время, парциальные давления не могут характеризовать даже равновесный состав газовой фазы при сварке под флюсом. Объясняется это тем, что парциальные давления, каждой отдельной системы реакций является процентным соотношением участников и продуктов реакции внутри данной системы. При этом реальные концентрации компонентов в реакционной зоне сварки при этом нивелируются. Выходом из данной ситуации может быть определение молярных (мольных) концентраций внутри системы уравнений определяющих процесс диссоциации каждого конкретного соединения при рассматриваемых температурах. Следующими этапом должно быть вычисление объемных мольных концентраций. Для этого необходимо знать объем неионизированного газа внутри реакционной зоны сварки (наплавки).

В результате проведенного анализа можно утверждать, что газовая фаза при сварке под флюсом является основой реакционной зоны сварки, через которую проходят практически все реакции оказывающие влияние на химический состав металла шва. Для проведения вычислений, которые могут обеспечить возможность расчета химического состава металла шва исходя из состава сварочных материалов и основного металла, а так же режима сварки, необходимо знать величину межфазных границ в реакционной зоне, а также состав газовой фазы (расчетный). При этом в таких расчетах обязательным условием является использование принципов неравновесной термодинамики, что вызвано наличием значительного градиента температур на этих межфазных границах.

В общем случае реакционная зона при сварке и наплавке под флюсом, если пренебречь изменением давления внутри шлакового купола, может рассматриваться как закрытая термодинамическая система. В тоже время, внутри этой системы, элементы реакционной зоны, разделенные между собой межфазными поверхностями должны рассматриваться как открытая система. Обмен потоками происходит через межфазную поверхность газ-металл, газ-шлак и шлак-металл.

При этом для открытых и не адиабатических систем необходимо провести различие между производной энтропии внутри системы:

$$\sigma = \frac{1}{V} \left(\frac{d_i S}{dT} \right) \quad (2)$$

и потоком энтропии через границу системы $\left(\frac{d_e S}{dt} \right)$

В каждом из этих случаев выражение для диссипации энергии принимает вид:

$$T_\sigma = \sum_j J_j X_j, \quad (3)$$

где σ — величина, характеризующая производство (изменение) энтропии; T_σ — скорость процесса диссипации энергии; J_j — скорость j -го потока (процесса); X_j — обобщенная термодинамическая сила j -го потока.

Если заранее неизвестна функция, характеризующая связь между скоростью j -го потока (процесса) и обобщенной термодинамической силой j -го потока для их определения применяют разложение в ряд Маклорена. В этом случае для вычисления скорости потока получаем:

$$J(X) = J(X) + J'(X) \frac{X}{1!} + J''(X) \frac{X^2}{2!} \quad (4)$$

Когда система находится в равновесии, термодинамические силы и скорости процессов равны нулю. При небольшом отклонении от состояния равновесия предполагается, что выполняется линейная зависимость между ненулевыми термодинамическими силами и соответствующими скоростями процессов. Объясняется это тем, что в этом случае обобщенная термодинамическая сила j -го потока стремится к нулю и разложение в ряд Маклорена запишется следующим образом:

$$J(X) = J(0) + J'(0) \frac{X}{1!} + J''(0) \frac{X^2}{2!} \quad (5)$$

Тогда $J(0) = 0$ и зависимость между скоростью j -го потока (процесса) и обобщенной термодинамической силой j -го потока принимает вид:

$$J(X) = J'(0)/X \quad (6)$$

Это линейное соотношение выполняется только при очень малых отклонениях от состояния равновесия и, в принципе, не являются термодинамическим по своей природе, так как не вытекает из законов термодинамики. В то же время, большинство процессов, не описываются с помощью линейной зависимости (6), т.к. величины движущих сил в них достаточно велики и должны рассматривать с учетом общего уравнения (4).

Так при электродуговой сварке (наплавке) под флюсом, как уже отмечалось, формально закрытая термодинамическая система, которую представляет реакционная зона, внутри, должна быть разделена на ряд открытых подсистем. В этом случае, исходя из производной энтропии внутри каждой подсистемы и потоками энтропии через границу подсистем (межфазную поверхность), которые теоретически можно охарактеризовать с помощью зависимости Маклорена, практически довольно приемлемо охарактеризовать многоуровневым

полиномом, полученным экспериментальным путем. На основе этого, возможно, определить феноменологические коэффициенты, связывающие теоретические расчеты равновесной термодинамики и реальные экспериментальные данные, характеризующие зависимость состава металла шва от применяемых сварочных материалов и режима сварки (наплавки).

Интегрированная (уточненная) физическая модель электродуговой сварки и наплавки под флюсом

Традиционная схема электродуговой сварки (наплавки) под флюсом представляет собой закрытую систему, в которой между жидким металлом капли на торце электрода и передней частью сварочной ванны существует дуговой разряд, образующий плазменную область, внутри шлакового купола. Дуговой разряд оказывает тепловое (энергетическое) воздействие на металл и флюс. В результате образуются расплавы металла и шлака, а так же газовая фаза. Расплав металла формирует сварочную ванну, расплавленный флюс — шлаковый купол (пузырь), который закрывает дугу от воздействия воздуха, а газовая фаза — область в которой существует дуговой разряд. Над поверхностью шлакового купола находится флюс, который не расплавился. В результате, считается, что реакционная зона сварки полностью изолирована от окружающей среды расплавом шлака (шлаковым куполом), который поддерживается за счет некоторого избыточного давления газовой фазы и представляет собой эластичную пленку из расплавленного флюса. Электродный металл переносится в сварочную ванну каплями различного размера, которые сползают по шлаковому куполу, напрямую перелетают через плазму дуги или иную часть газовой фазы, а при определенных режимах сварки могут значительно укорачивать и даже замыкают дуговой промежуток. В дальнейшем расплавленный металл сварочной ванны затвердевает, непосредственно формируя, сварочный шов.

Проведенный нами анализ фотографий рентгенограмм, показывает, что составляющие газовой фазы при сварке (наплавке) под флюсом прорываются через шлаковый купол. Они образуют область высоко нагретых газов, которая располагается параллельно электроду и поднимается вдоль его оси на величину 3–5 диаметров, что приводит к нарушению сплошности шлакового купола вокруг электрода. На фотографиях рентгенограмм это отображается в виде светлых областей. Этот процесс напрямую связан с наличием избыточного давления в шлаковом куполе. Это давление возникает в результате процессов испарения металла и шлака (парообразования), а

также процессов термической диссоциации соединений, которые входят в состав флюса и химических реакций, в результате которых происходит образование газообразных продуктов. Необходимо отметить, что существуют и другие составляющие избыточного давления.

В общем случае избыточное давление в шлаковом куполе ($P_{изб}$), является слагаемым следующего ряда составляющих:

$$P_{изб} = P_{п.г} + P_{ок.р.} + P_{пар} + P_{дис}, \quad (7)$$

где $P_{п.г}$ — давление потока газов (газокинетическая составляющая давления дугового разряда); $P_{ок.р.}$ — давление, вызванное образованием газообразных продуктов реакций, вследствие окислительных реакций; $P_{пар}$ — давление связанное с процессом парообразования протекающего под воздействием плазмы дугового разряда; $P_{дис}$ — результат процессов термической диссоциации компонентов газовой фазы.

Попытка анализа величин составляющих избыточное давления в шлаковом куполе ($P_{изб}$) показала, что численное нахождение их, до настоящего времени, является довольно сложной задачей. Так, например, экспериментальное определение величины газокинетической составляющей давления, с помощью вычитания из общего давления значения электродинамической силы определяемой по величине короткого замыкания вызывает вполне обоснованные сомнения [25]. Давление, вызванное образованием газообразных продуктов реакций, вследствие окислительных реакций ($P_{ок.р.}$) может быть приблизительно оценено исходя из экспериментальных данных по содержанию СО (CO_2) и других компонентов в сварочном аэрозоле. По данным экспериментов [26] содержание СО в составе газовой фазы для керамических флюсов, которые не содержат карбонатов, составляет 0,5–0,6 г на 1 кг флюса, а при наличии карбонатов, количество СО возрастает до 20 г/кг. При этом увеличивается пылевыделение и снижается концентрация соединений марганца в сварочном аэрозоле, которая так же напрямую зависит от формы нахождения соединений марганца в флюсе. Эти данные показывают, что в реакционной зоне сварки устанавливается определенное состояние равновесия, между компонентами газовой фазы, основой которого являются результаты образования газообразных продуктов окислительных реакций, испарения (парообразования) элементов и процессов термической диссоциации соединений.

Процессы парообразования и как следствие наличие составляющей общей части давления в шлаковом куполе ($P_{пар}$), в условиях сварки, традиционно рассматриваются, как фазовый переход первого рода, в результате которого между

расплавом и газом устанавливается равновесие, а давление газа приравнивается к давлению насыщенного пара над расплавом при определенной температуре. Однако, особенностью сварки (наплавки) под флюсом, является то, что воздействие плазмы дугового разряда на материалы сопровождается наличием большого градиента температур не только на участке прямого взаимодействия плазмы, где проходит процесс парообразования, а и на других межфазных границах реакционной зоны. Кроме этого, еще одной особенностью является относительно малое время существования реакционной зоны сварки, как статической системы (менее 2 секунд [17]).

В результате, учитывая избирательный характер процесса испарения расплавов и неравновесные термодинамические условия, на межфазных границах вызванные наличием резкого изменением концентрационных и температурных условий на этих границах, процессы испарения при электродуговой сварке под флюсом должны рассматривать комплексно с учетом общего соотношения компонентов в реакционной зоне сварки.

Оценочный анализ слагаемых избыточного давления в шлаковом куполе ($P_{изб}$), показал, что в соответствии с расчетами, при увеличении температуры до 5000 К количество молей в газовой

фазе в результате процессов термической диссоциации оксидов возрастает в 3–4 раза, что сопоставимо с выделением СО при добавлении карбонатов в состав флюса. Понятно, что при этом возрастает и избыточное (суммарное) давление внутри шлакового купола, что приводит к его разрыву. Аналогичное явление наблюдается и при протекании окислительных реакций в газовой фазе и на ее межфазных границах с образованием газообразных продуктов реакции.

Построение физической модели реакционной зоны сварки под флюсом проведем на основании реконструкции фотографий рентгенограмм с помощью ПК и специализированного программного обеспечения. В результате получаем объемную модель электродуговой сварки под флюсом (рис. 2, 3).

Данные модели характеризуют две разновидности электродуговой сварки под флюсом:

- сварка дугой с внешней составляющей, которая характерна для высоких значений напряжения ($\approx \geq 30$ В), рис. 2;

- сварка погруженной дугой, характерной для низких значений напряжения; ($\approx \leq 30$ В), рис. 3.

Реконструированные, по фотографиям рентгенограмм, рисунки показывают, что в этих двух случаях кардинально изменяются условия взаимодействия фаз. При сварке дуговым разрядом,

имеющим значительную внешнюю составляющую, образующиеся газы локализируются в объеме газовой фазы и прорываются вдоль электрода (рис. 2). В случае погруженной дуги (низкое напряжение) выделение газов носит более хаотический характер. Некоторая доля газов прорывается вдоль оси электрода, остальная их часть выделяется по всему объему реакционной зоны сварки, в том числе и в ее головной области (рис. 3). По видимому, это связано с объемом реакционной зоны сварки, который при низком напряжении снижается за счет погружения дугового разряда в основной металл и приводит к снижению площади динамической межфазной поверхности основную долю которой составляет расплав шлака (шлаковый купол).

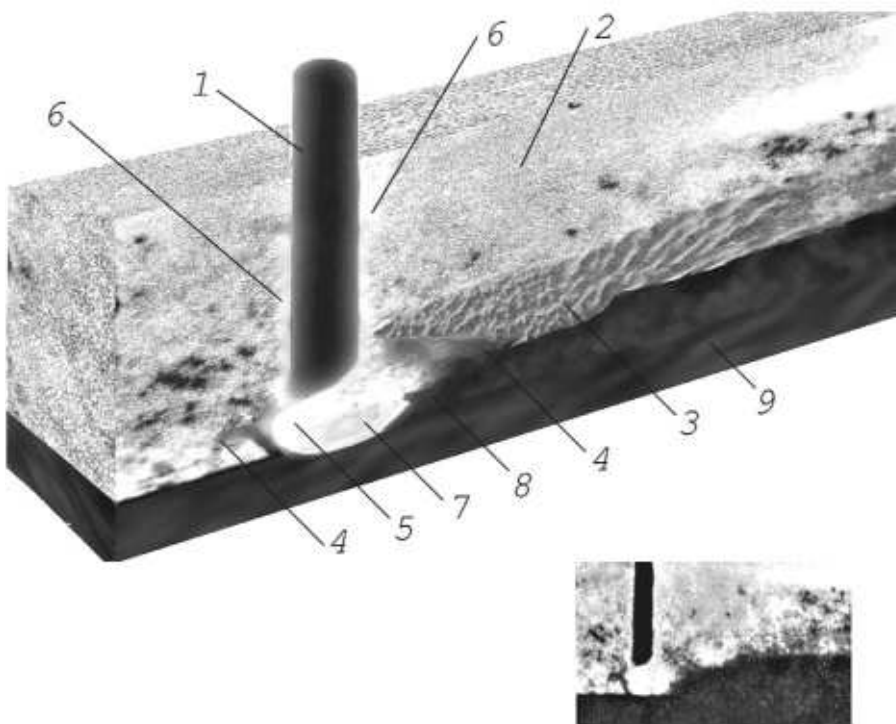


Рис. 2. Объемная модель электродуговой сварки под флюсом реконструированная по фотографии рентгенограммы работы [16] (диаметр электрода 5 мм, флюс АН-3, пемзовидной грануляции, $V_{св} = 25$ м/час, $I_{св} = 800$ А $U_d = 48$ В).

1 – электродная проволока; 2 – флюс; 3 – шлаковая корка; 4 – расплав шлака; 5 – внутренняя составляющая газовой фазы; 6 – внешняя составляющая газовой фазы; 7 – зеркало сварочной ванны; 8 – сварной шов; 9 – основной металл

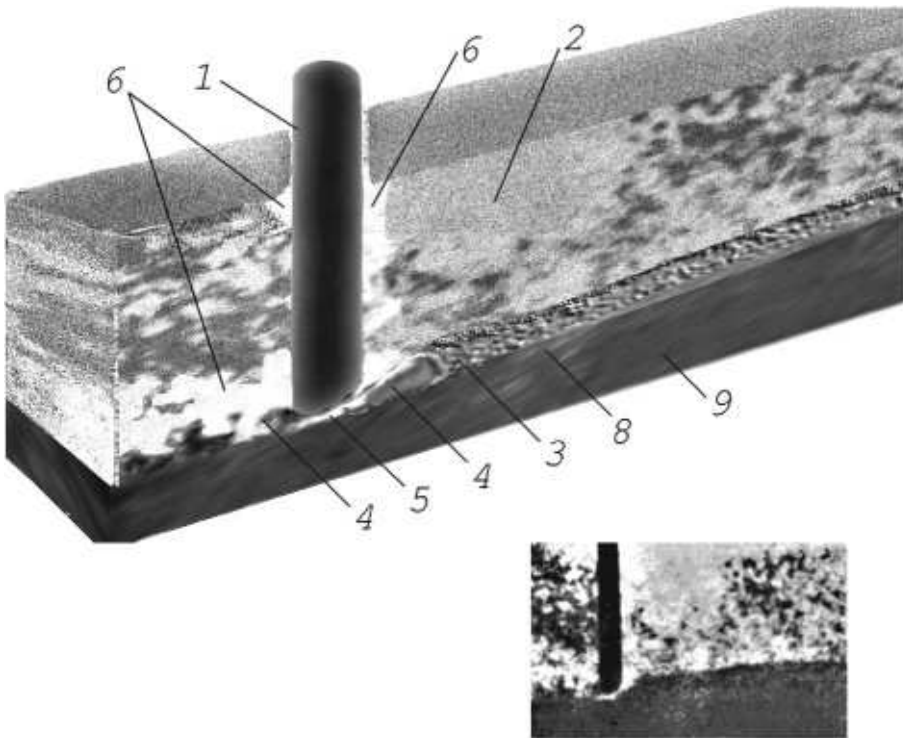


Рис. 3. Объемная модель электродуговой сварки под флюсом реконструированная по фотографии рентгенограммы работы [16] (диаметр электрода 5 мм, флюс АН-3, пемзовидной грануляции, $V_{св} = 25$ м/час, $I_{св} = 800$ А $U_d = 30$ В).
1 – электродная проволока; 2 – флюс; 3 – шлаковая корка, 4 – расплав шлака; 5 – внутренняя составляющая газовой фазы; 6 – внешняя составляющая газовой фазы; 7 – зеркало сварочной ванны; 8 – сварной шов; 9 – основной металл

Еще одним существенным отличием приведенных схем является то, что при низком напряжении на дуге, шлак затекает в переднюю область реакционной зоны сварки, при этом ограничивая возможность взаимодействия газовой фазы с металлом ванны. Кроме этого наличие газов перед реакционной зоной сварки (рис. 3), в случае погруженной дуги, подтверждает гипотезу об интенсивном испарении флюса плазмой дугового разряда.

С точки зрения металлургического влияния флюса на металл шва можно утверждать, что при наличии внешней составляющей дугового разряда, при сварке под флюсом, влияние газовой фазы на химический состав металл шва должно быть максимальным. При низком напряжении влияние газовой фазы уменьшается, при этом увеличивается роль реакций на межфазной поверхности шлак-металл. Эти рассуждения хорошо совпадают с имеющимися экспериментальными данными характеризующие влияние режима сварки на состав металла шва [25–27]. Еще одним важным установленным фактом является то, что ключевым элементом реакционной зоны сварки под флюсом является дуговой разряд, определяющий взаиморасположение, условия взаимодействия и саму физическую модель дуговой сварки под флюсом.

В результате можно сформулировать основные положения, определяющие физическую схему процесса и особенности металлургического взаимодействия в реакционной зоне сварки.

В реакционной зоне при сварке под флюсом можно выделить четыре основные фазы, принципиально отличающиеся по своим физическим свойствам: плазму дугового разряда и неионизированный газ составляющие газовую фазу, а также расплавы металла и шлака (флюса). Все остальные составляющие реакционной зоны сварки являются производными от этих фаз.

Газовую фазу составляет плазма и неионизированный газ. В плазме дугового разряда с точки зрения физических процессов можно выделить "шнур" дугового разряда

(и пограничную область, которая непосредственно примыкает к "шнур"). "Шнур" дугового разряда является наиболее нагретой частью газовой фазы и во многом определяет ее основные физико-химические характеристики. Пограничная область дугового разряда, примыкающая к "шнур" является переходной зоной между центральной частью дугового разряда ("шнуром") и неионизированным газом, заполняющим остальную часть газовой фазы. Понятно, что границы пограничной области условны и размыты особенно со стороны низкотемпературной ("хвостовой") области газовой фазы. Эта область газовой фазы является, как бы продолжением пограничной области, однако отличается от нее более низкими температурами и отсутствием ионизированной составляющей. Проявляется это в продольном сечении реакционной зоны сварки (рис. 1, а). При возникновении плазменных потоков, электронейтральность низкотемпературной области газовой фазы может нарушаться.

Плазма дугового разряда оказывает определенное силовое воздействие (давление) на расплавленный металл, а процессы, сопровождающие ее существование, увеличивают давление в газовой фазе (шлаковом куполе).

Действие дугового разряда на материалы при сварке под флюсом неравномерно. Основная часть



энергии дугового разряда передаться передней (головной) части реакционной зоны сварки и поглощается материалами которые расплавляются и превращаются в перегретый пар, который, проходя через плазму дуги формирует газовую фазу. "Хвостовая" часть реакционной зоны сварки меньше поддается прямому влиянию дугового разряда. Такое влияние может наблюдаться в результате воздействия плазменных потоков, образующихся в реакционной зоне сварки из-за эффекта, связанного с наличием динамических изменений, которые наблюдаются в сварочной ванне [7, 17, 19] и носят скорее флуктуационный характер.

В "хвостовой" части реакционной зоны сварки перегретая парогазовая фаза охлаждается. Это приводит к тому, что в ней протекают процессы по образованию химических соединений и конденсации компонентов газовой фазы.

Процессы испарения имеют характер сублимации и значительной мере определяют количественный состав компонентов в газовой фазе. При этом необходимо учитывать особенности термической диссоциации, которые вначале протекают в прямом направлении, а потом при снижении температуры – в обратном.

Часть газовой фазы прорывается наружу, нарушая целостность шлакового купола, что происходит при превышении определенного внутреннего давления в куполе ($P_{изб}$). Основная часть газов прорывается позади электрода. Выделение газов в районе электрода подтверждается реконструированными рентгенограммами (рис. 2, 3) и данными работ [7, 16–18].

В результате можно констатировать, что детальный анализ процесса появления газовой фазы при электродуговой сварки под флюсом полностью изменяет физико-химическую модель реакционной зоны и в дальнейшем позволяет проводить металлургические расчеты состава металла шва с учетом процессов испарения (сублимации) и термической диссоциации ее компонентов.

Выводы

В результате предложена интегрированная физико-химическая модель электродуговой сварки (наплавки) под флюсом, ключевым элементом которой является газовая фаза, которая определяет особенности существования дугового разряда и протекания металлургических процессов определяющих химический состав металла шва. Представлена концепция расчета избыточного давления в шлаковом куполе. Обосновано необходимость применения основных положений неравновесной термодинамики при проведении металлургических расчетов и показана необходимость учета температурных и концентрационных условий на

межфазных границах. Предложена оригинальная структурная схема взаимодействия фаз и физические объемные модели, отвечающие двум принципиально различным схемам сварки (наплавки) под флюсом.

Литература

1. KANJILAL P., PAL T. K., AND MAJUMDAR S. K. Prediction of Element Transfer in Submerged Arc Welding/ WELDING JOURNAL, MAY 2007, VOL. 86 – P. 135–146.
2. Походня И.К., Коляда Г.Е., Явдоцин И.Р., Касаткин О.Г., Демченко Л.И. Прогнозирование химического состава металла, наплавленного электродами с рутиловым и ильменитовым покрытием. // Автоматическая сварка, 1976. – № 7. – С. 1–4.
3. Бороненков Б.Н., Саламатов А.М. Прогнозирование химического состава металла шва при дуговой сварке методом математического моделирования процессов взаимодействия металла, шлака и газа. – Свердловск, 1982. – 50 с.
4. А.А. Буки. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. – М.: Машиностроение, 1991. – 287 с.
5. Б.А. Кох. Графо-аналитический метод определения степени легирования и раскисления шва. // Автоматическая сварка, 1982. – № 4. – С.18–22.
6. U. Mitra and T.W. Eagar Slag -Metal Reactions During Welding: Part III. Verification of the Theory, METALLURGICAL TRANSACTIONS, VOL. 22B (2), 1991. – P. 83–100.
7. Л.А. Жданов. Современные представления о физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом. Часть 2. Экспериментальные исследования реакционной зоны при электродуговой сварке под флюсом // Технологические системы, 2008. – №1. – С. 38–45.
8. 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.
9. В.Г. Кузьменко. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом// Автомат. сварка, 1998. – № 3. – С. 14–19.
10. В.Г. Кузьменко. Оценка роли шлаков в различных сварочной ванны при электро-дуговой сварке под флюсом. //Автоматическая сварка, 1998. – № 12. – С. 11–21.
11. В.Г. Кузьменко. К особенностям плавления флюса при сварке// Автомат. сварка, 2000. – № 11. – С. 60.
12. Б.Н. Бадьянов. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Сварочное производство, 1999. – № 11. – С. 8–11.
13. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1954. – 296 с.

14. Кархин В.А. Тепловые основы сварки. — Ленингр. гос. техн. ун-т. Л., 1990. — 100 с.
15. Справочник по сварке. Под редакцией Е.В. Соколова т.1. — М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. — 555 с.
16. Н.Г. Остапенко, Б.И. Медовар. Исследование дуги, горящей под флюсом, с помощью рентгеновских лучей, "Автогенное дело" № 11, 1947. — С. 16–20.
17. П.Г. Гребельник. Рентгеноисследование процесса автоматической сварки под флюсом, "Автоматическая сварка", 1950. — № 6 — С. 18–29.
18. И.К. Походня. Метод исследования процесса плавления и переноса электродного металла при сварке. "Автоматическая сварка", 1964. — № 2.
19. И.К. Походня, Б.А. Костенко. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом, "Автоматическая сварка", 1965. — № 10.
20. Автоматическая электродуговая сварка // Под ред. Е.О.Патона. М.: Машгиз, 1953. — 396 с.
21. Технология электрической сварки металлов и сплавов. Под редакцией Б.Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
22. Багрянский К.В. Электродуговая сварка и наплавка под керамическими флюсами. — Киев: Техніка, 1976. — 184 с.
23. В.Т. Котик, Л.А. Жданов, Н.М. Стреленко. Наличие рідкої шлакової оболонки при автоматичному зварюванні під флюсом. // Технологические системы, 2008. — № 2 — С. 45–49.
24. А.М. Бигеев. Металлургия стали. — Металлургия, 1988.
25. А.А. Ерохин. Силовое воздействие дуги на расплавленный металл // Автоматическая сварка, 1979. — № 7. — С. 21–26.
26. К.А. Олейниченко, К.В. Багрянский, А.К. Олейниченко, Л.Ф. Араева. Влияние состава керамических флюсов на пыле- и газовыделение при автоматической наплавке. // Сварочное производство, 1967. — № 4. — С. 47–48.
27. И.И. Фрумин. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1961. — 422 с.