

УДК 621.791.75.01

Жданов Л.А.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

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

ЧАСТЬ 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Анотація

На підставі аналізу існуючих фізичних схем електродугового зварювання під флюсом показано, що є певна динаміка їх розвитку. У результаті детального розгляду різноманітних підходів до формування реакційної зони виявлені основні існуючі протиріччя і показано необхідність подальшого всебічного аналізу наявних експериментальних даних по дослідженню реакційної зони зварювання під флюсом. Запропоновано скоректовану схему.

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

Автоматическая сварка под флюсом, как способ электродуговой сварки промышленной значимости, начал развиваться в 1940-х годах [1], хотя запатентован был гораздо ранее (1929 г). Довольно длительное время велась дискуссия о наличии дугowego разряда при сварке под "слоем гранулированных веществ". Проведенное осциллографирование процесса сварки под флюсом [2], а также киносъемка процесса в рентгеновских лучах [3, 4] показали наличие такого дугowego разряда, что является одним из отличительных особенностей

этого способа сварки. Дальнейшие исследования подтвердили сформулированные ранее представления о сварке под флюсом, как о процессе, при котором электрический дуговой разряд существует в парогазовом пространстве между электродом и основным металлом под оболочкой жидкого шлака [5–12]. В результате за основу принимается традиционная физическая модель, предложенная академиком Е.О. Патеном [1], которая включает в себя, как обязательный фактор, наличие замкнутого шлакового купола, в котором существует дуговой разряд. Данный шлаковый купол ограничивает и изолирует реакционную зону сварки.

Однако в последнее время появились работы, в которых сплошность шлакового купола ставится под сомнение [13–18]. Понятно, что изменение или уточнение самой физической модели процесса электродуговой сварки под флюсом вносит существенные изменения во все стадии этого процесса, и как результат в представление о процессе формирования конечного состава металла шва. Вызвано это неизбежной модификацией самой картины физико-химического взаимодействия в реакционной зоне, которое происходит при изменении физической модели.

Постановка задачи

Исследованию процесса электродуговой сварки под флюсом посвящено большое количество работ [1–25]. При этом обычно используется традиционная физическая модель схемы данного процесса [1–10, 19–25]. Эта модель предопределяет наличие сварочной дуги (дугowego разряда), которая горит (существует) между изделием и концом

сварочной проволоки подающейся по мере расплавления в зону сварки. Дуговой разряд закрыт слоем флюса. Под влиянием тепла дуги основной металл и флюс плавятся, а флюс образует вокруг зоны сварки эластичную пленку, изолирующую эту зону от доступа воздуха. Капли расплавленного дугой металла сварочной проволоки переносятся через дуговой промежуток в сварочную ванну, где перемешиваются с основным расплавленным металлом. По мере перемещения дуги вперед металл сварочной ванны начинает охлаждаться, затвердевая, образуя шов.

Появившиеся в последствии схемы и физико-химические модели электродуговой сварки под флюсом различных авторов в той или иной степени дополняют традиционную физическую модель, а так же друг друга, включая в себя некоторые новые особенности и аспекты физико-химического взаимодействия сосуществующих фаз.

Наиболее отличной от традиционной модели является схема процесса сварки под флюсом предложенная В.Г. Кузьменко [26]. По мнению Б.Н. Бадьянова [27] особенности данной схемы состоят в следующем:

- ограниченное укрытие расплавленным шлаком сварочной ванны в преддуговой зоне с отсутствием сплошности шлаковой оболочки в ее передней части;

- образование (наличие) протяженного шлейфа жидкого шлака над швом после кристаллизации сварочной ванны;

- механизм делимости шлаковой корки, вытекающий из различий в скоростях остывания ее слоев.

Необходимо отметить, что по нашему мнению, принципиальным отличием данной схемы, от традиционной, является отсутствие сплошности шлакового купола в преддуговой зоне. При этом изменяются условия плавления металла и шлака, а так же механизм защиты реакционной зоны сварки от воздуха. Если допустить, что такое нарушение сплошности шлакового купола наблюдается в головной части реакционной зоны сварки, то градиент температуры определяемый плазмой дугового разряда и ее пограничными областями вызывает принципиальное изменение схемы образования газовой фазы в шлаковом куполе, формирования концентрационных условий на межфазных границах и как следствие, оказывает значительное влияние на форму шва, его формирование и конечный химический состав металла шва.

К сожалению, в настоящее время практически невозможно провести прямой эксперимент, подтверждающий ту или иную модель. Однако, некоторые косвенные данные свидетельствуют о недостатках существующей традиционной модели.

Так принципиально не удастся объяснить разницу, возникающую при расплавлении керамического и плавного флюсов, хотя общеизвестно, что одинаковые, по химическому составу, но разные по способу изготовления флюсы дают не только различный по химическому составу металл шва, но и кардинально отличающиеся по форме и по формированию швы [28, 29, 30, 31].

Еще одной проблемой является, то, что существующие схемы классификации флюсов, не позволяют в общем случае прогнозировать влияние состава флюса на химический состав металла шва, содержание в нем кислорода и кремне-, марганцево-восстановительные процессы.

Полученные в последнее время новые данные по осциллографированию электродуговой сварки под флюсом на переменном токе с помощью персонального компьютера совмещенного с аналогово-цифровым преобразователем свидетельствуют о наличии аномальных зон на этих осциллограммах, в частности опережающего между током и напряжениям сдвига фаз, что не может быть объяснено с точки зрения классической теории.

Все это говорит о том, что анализ самой физико-химической модели сварки под флюсом с целью ее дополнения и дальнейшего усовершенствования является актуальной задачей. Такой анализ может быть проведен на основе уже существующих физических и физико-химических моделей этого способа сварки при сопоставлении их с имеющимися экспериментальным данным. На базе этого анализа необходимо выявить структурные элементы моделей, которые полностью отвечают экспериментальным данным, уточнить дискуссионные зоны и предложить интегрированную модель сварки под флюсом обобщающую существующие и позволяющую связать процессы протекающие в реакционной зоне сварки под флюсом с конечным составом металла шва.

Существующие физические схемы и физико-химические модели электродуговой сварки под флюсом

Традиционная физическая модель электродуговой сварки под флюсом была предложена академиком Е.О. Патеном [1]. Согласно этой модели электрическая дуга горит под слоем сыпучего флюса в закрытой полости, защищенной от влияния атмосферы эластичной оболочкой расплавленного шлака. Сыпучий флюс выполняет роль электродного покрытия, надежно закрывает место сварки и предотвращает возможность разбрызгивания жидкого металла. Процессы, которые происходят при сварке под слоем флюса, отличаются наличием в плавильной зоне трех взаимодейст-

вующих многокомпонентных фаз: расплавленный флюс (шлаковая ванна), расплавленный металл и газ (плазма). В последствии, каждый исследователь обычно, в той или иной степени дополнял и усовершенствовал эту модель.

Необходимо отметить, что приведенные в дальнейшем физические схемы и физико-химические модели электродуговой сварки под флюсом, мы попытались рассмотреть в хронологической последовательности с точки зрения литературных источников и максимально приближенно к авторской редакции.

Г.Л. Петров [32] предлагает следующую физико-химическую модель сварки под флюсом (рис. 1, а, б). При автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом расплавляющийся гранулированный флюс взаимодействует и с каплями и со сварочной ванной, причем дуга горит в газовом пузыре, контактирующем с металлом капель и ванной. Состав газов в пузыре в основном определяется газами и парами, выделяющимися при переправлении дугой металла электродной проволоки, основного металла и шлака. Газовая фаза состоит из паров металла, ряда соединений, выделяющихся из металла и флюса (шлака), газов, содержащихся в металле и получаемых от диссоциации соединений.

В дальнейшем Г.Л. Петров на основании работ Удо Франца [9, 33], который проводил кино съемку процесса электродуговой сварки под флюсом, представил схему перехода капель (рис. 1, в). В данной схеме показывается, что характер переноса электродного металла внутри газовой полости изменяется в зависимости от режима сварки.

Это изменение характеризуется способом перехода капли через реакционную зону сварки. Капля может перетекать по стенкам шлакового купола (при малых токах) и проходить через реакционную зону сварки без перетекания (при больших токах). Под малыми токами ($I_{св}$) подразумеваются токи в 380—400 А при диаметре проволоки 3 мм, т.е. плотность порядка 55 А/мм². Отмечается, что при этих токах капли большие. С увеличением силы тока, после достижения некоторой критической величины, которая зависит от марки флюса и напряжения на дуге размер капли уменьшается и капли начинают перелетать через дуговой промежуток без стекания. Для подтверждения данной схемы автор проводит анализ данных И.И. Фрумина по зависимости химического состава металла шва от режима наплавки [10].

Не обсуждая, на данном этапе, процессы перехода капель при электродуговой сварке под флюсом необходимо отметить, что Удо Франц [9, 33] проводил кино съемку через специальную керамическую трубочку, что несколько изменяло физическую картину самого процесса. Кроме этого, к сожалению, нам не удалось по данным работ [9, 32, 33] выявить влияние полярности на процесс перехода капель, хотя изменения в характере перехода капель при изменении полярности должно быть принципиальным. На это указывает как сама теория сварочных процессов [1, 33—37], так и экспериментальные данные, полученные при исследовании дуги, горящей под флюсом, с помощью рентгеновских лучей [3, 4, 8]. Кроме этого по материалам работ [9, 33] вообще сложно оценить особенности методики визуализации реакционной

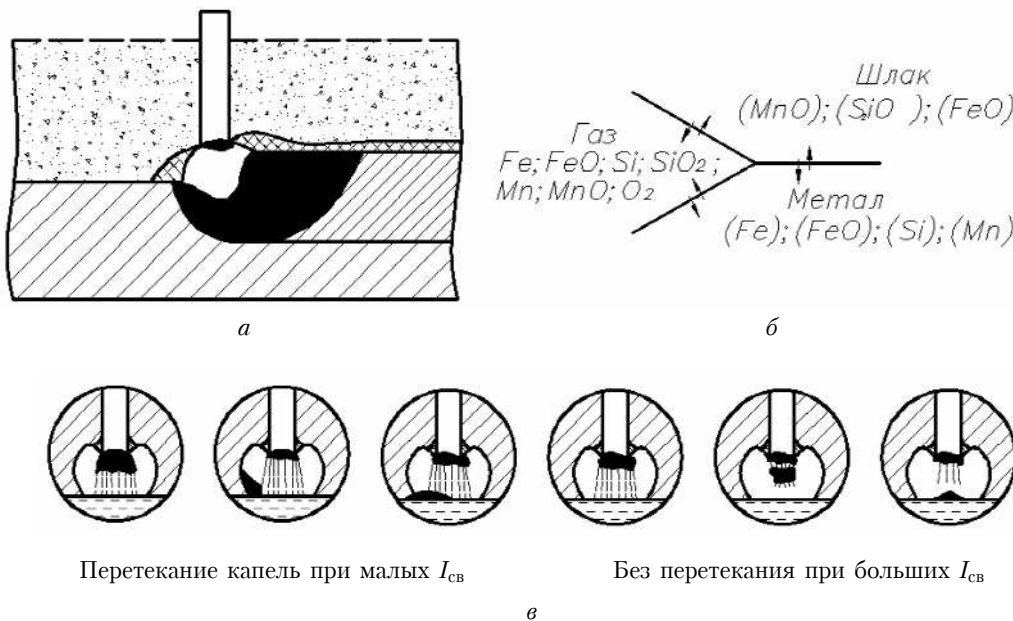


Рис. 1. Общая схема взаимодействия металла с газами и шлаком при автоматической сварке под флюсом [32]

зоны сварки, которую предложил Удо Франц и оценить полученные им результаты, так как они являются материалами конференции [9] и коллоквиума [9, 33]. Горазда более информативными являются работы опубликованные Удо Францем в специализированном журнале *SchweiBtechnik* в 1965–1966 годах.

Подводя итог рассмотренной схемы сварки, под флюсом предлагаемой Г.Л. Петровым можно сказать, что по нашему мнению, при анализе физико-химических процессов в реакционной зоне сварки под флюсом не учитывается возможность появления в газовой фазе продуктов окислительных и окислительно-восстановительных реакций. Кроме этого, несколько упрощенно подается процесс взаимодействия фаз при сварке, т.е. рассматриваются только реакции на межфазных границах (рис. 1, б), при этом две жидкие фазы возникают в результате плавления, а третья — газообразная, как результат выделения из металла и флюса (шлака) паров ряда соединений и газов получаемых от диссоциации этих соединений.

Обращает на себя внимание, что на представленной физической схеме сварки под флюсом (рис.1, а) толщина шлака перед дугой довольно значительна, затем, на уровне электрода уменьшается практически до нуля, а потом снова возрастает. Причем, учитывая, что на рис. 1, а представлен продольный разрез через сварочную ванну, видно,

что длина шлаковой ванны перед дугой сопоставима и даже превышает длину шлака над газовым пузырем. Следующий момент — это "нависание" сварочной ванны над газовым пузырем, что должно предопределять наличие большого избыточного давления газов в пузыре. Явным достижением схемы является попытка описать процесс переноса электродного металла и возможность диссоциации соединений в газовой фазе.

Различные попытки рассмотреть процесс сварки под флюсом с точки зрения протекания химических реакций привели к появлению физико-химической модели, в которой была сделана попытка, учесть практически все потоки реагирующих веществ (рис. 2) в результате, чего была тщательно детализирована сама физическая модель. Наиболее полно данная схема представлена А.А. Буки [38].

Если внешне физическая картина процесса электродуговой сварки под флюсом практически не изменилась, некоторые элементы получили свое дальнейшее развитие, а определенные — были кардинально видоизменены. Так, изменилась форма сварочной ванны 4. Толщина расплавленного металла под плазмой дугового разряда значительно уменьшилась, а "нависающая" часть сварочной ванны удерживается расплавом шлака 13, который является демпфирующей составляющей (прослойкой) между хвостовой частью сварочной

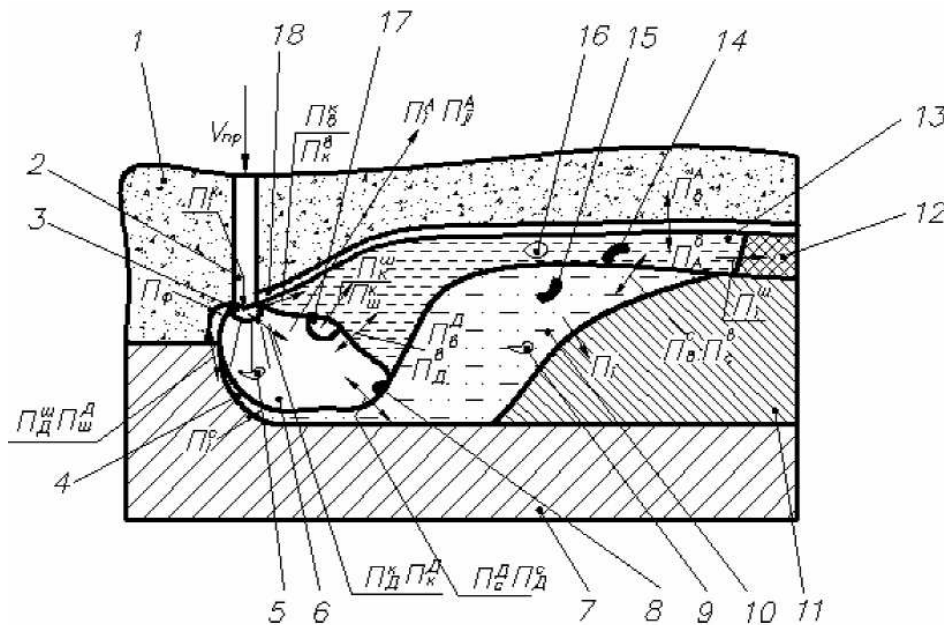


Рис. 2. Схема процесса сварки под флюсом представленная А.А.Буки [38]

1 — флюс; 2 — электрод; 3 — капля на конце электрода; 4 — сварочная ванна; 5 — капли жидкого металла; 6 — дуговой промежуток (шлаковый купол); 7 — основной металл; 8 — шлаковые капли на поверхности жидкого металла; 9 — газовые пузыри в жидком металле; 10 — хвостовая часть сварочной ванны; 11 — шов; 12 — шлаковая корка; 13 — жидкий шлак; 14 — капли металла в шлаке; 15 — шлак в жидком металле; 16 — газовые пузыри в жидком шлаке; 17 — капли оторвавшиеся от электрода, на поверхности жидкого шлака; 18 — полурасплавившийся флюс; П_ш^ш - потоки веществ, нижний индекс показывает откуда поток, верхний — куда поток; ш — шлаковая корка, в — шлаковая ванна, к — капля на электроде, с — сварочная ванна; Д — дуговой промежуток, А — атмосфера, воздух), без индекса — обозначает поток элементов в шов

ванны 10 и дуговым промежутком (шлаковым куполом 6). Кроме этого шлаковый купол (по-видимому, его внутренне пространство) отождествляется с дуговым промежутком, что довольно спорно. Прослойка под дуговым промежутком изменяется практически от нулевой величины в передней (головной) своей части 4 до размеров сопоставимых с глубиной сварочной ванны в хвостовой части 10, хотя и в несколько раз меньше ее. В дуговом промежутке, присутствуют капли жидкого металла 5 и шлака 8. В шлаковом расплаве — капли металла 14. В жидком металле соответствующем хвостовой части сварочной ванны 10 имеются газовые пузыри 9 и частицы шлака 15. На межфазных границах газ-расплав присутствуют капли металла 17 и шлака 8.

Приведенные данные показывает, что физическая модель, довольно усложнилась, в частности, учтена возможность наличия капель электродного металла одновременно перетекающих в сварочную ванну 17 и перелетающих через дуговой промежуток 5, а так же появления шлаковых и металлических капель и газовых пузырей в расплавах.

Уменьшение прослойки расплавленного металла под дуговым промежутком и наличие демпфирующей прослойки расплавленного шлака позволяет более логично объяснить нависание металлической ванны над шлаковым куполом. Сам шлаковый купол, есть следствием воздействия на основной металл и флюс дугового разряда. Это, по-видимому, приводит к тому, что автор отождествляет эти два понятия, т.е. дуговой разряд и шлаковый купол.

Следующим оригинальным моментом, предлагаемым А.А. Буки, является предположение о наличии в шлаковом куполе плазменных потоков. Данное предположение выдвигается на основании анализа экспериментальной работы, в которой исследовался дуговой разряд, существующий в аргоне между неплавящимся вольфрамовым электродом и пластиной из нержавеющей стали, а так же плавящимся алюминиевым электродом и такой же пластиной, и в углекислом газе между стальным электродом и пластиной [39], т.е. процесс сварки под флюсом эти данные могут характеризовать только косвенно.

В результате описание процесса сварки под флюсом выглядит следующим образом: столб дуги от электрода к ванне расширяется, формируя мощный плазменный поток от электрода к ванне. Создается реактивное давление на электрод. Плазменные потоки увлекают пары электродного металла и шлака, мелкие капли и газы к сварочной ванне. Плазменный поток отражается от ванны (от встречного шлакового плазменного потока), и со скоростью $V_{рв}$ омывает шлаковый купол. Встречный плазменный поток создается за

счет того, что сварочная ванна, в которой в результате реактивного давления потока плазмы создается кратер, отражает частицы, как преграда, и плазменные потоки меняют свое направление. Плазма дуги перемешивается этими потоками столь интенсивно, что состав шлакового купола можно принять однородным (не считая пограничных областей). В пограничных областях температура плазмы понижается, образуются соединения (окислы), конденсирующиеся в шлак.

Дуга интенсивно плавит и испаряет электродный металл. Передним фронтом дуги плавится и испаряется флюс и основной металл. Чем большее напряжение на дуге, тем быстрее плавится и испаряется шлак. В дуговом промежутке вследствие высокой температуры окислы и другие соединения подвергаются диссоциации.

Газовые пузыри всплывают из жидкого металла в шлак и совместно с газовыми пузырями из шлака поступают в воздух. Этому препятствует не полностью расплавленный флюс, поэтому на поверхности шлаковой корки наблюдаются поры. Мелкие капли жидкого металла и шлака оседают в сварочную ванну. Шлаковые капли легче металла, всплывают вверх и переходят в шлак. Капли шлака не успевшие всплыть, образуют шлаковые экзогенные включения.

Процессы физико-химического взаимодействия А.А. Буки рассматривает в виде потоков веществ (рис. 3), при этом сама структурная схема, так же гораздо усложняется.

Эта схема является попыткой структуризовать процесс сварки под флюсом с точки зрения движения массопотоков и представляет несомненный интерес. Она включает в себя не только взаимодействующие фазы, а и другие компоненты являющиеся участниками данного процесса и соответствующие предложенной автором физической схеме под флюсом. В качестве исходных параметров приняты: электрод, флюс и основной металл. Как выходящие — сварочный шов, шлаковая корка и воздух (атмосфера). Все массопотоки напрямую или через промежуточные составляющие связаны с дуговым промежутком. Понятно, что основным выходящим параметром является металл сварочного шва, т.е. анализ всех потоков в плавильной зоне должен вестись с точки зрения оценки их влияния именно на шов.

Формально, в соответствии с предложенной физической моделью, в схеме потоков не учтены: процессы появления и взаимодействия газовых пузырей, всплывающих из жидкого металла, и образование газовых пузырей в шлаке, а также потоки, в результате которых, появляются неметаллические включения в металле шва, хотя они могут оказывать существенное влияние на конечный состав металла шва.

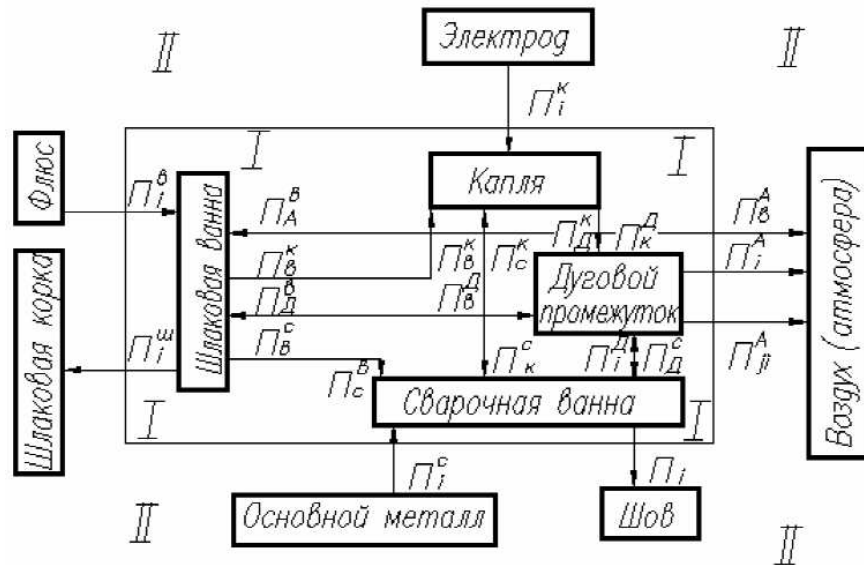


Рис. 3. Схема потоков при сварке под слоем флюса представленная А.А. Буки [38]

I — плавильная зона; *II* — окружающая среда; *III* — поток веществ из флюса в шлаковую ванну. *II* — потоки, верхним индексом обозначается направление потоков (куда поток), нижним индексом — откуда поток или какого вещества; *ш* — шлаковая корка, *в* — шлаковая ванна, *к* — капля на электроде, *с* — сварочная ванна; *Д* — дуговой промежуток, *А* — атмосфера, воздуха; *i*-й элемент входит в свариваемый шов; *ij*-й окисел *i*-го элемента

Кроме этого, в схеме движения массопотоков отсутствуют потоки внутри шлакового купола, т.е. обмен между плазмой дуги и газовой фазой, а так же реакции в газовой фазе. Это является следствием принятой физической модели, т.к. автор считает состав шлакового купола однородным.

К сожалению А.А. Буки не выделяет в данной структурной схеме приоритетные массопотоки, которые оказывают основное влияние на формирование конечного состава металла шва и процессы его образование. Хотя последующий тщательный анализ массообмена между металлическим расплавом и шлаком, шлаковой ванны и столба дуги с воздухом, флюса с металлом капель и сварочной ванны проведенный автором, показывает, что при формировании математической модели необходимо учитывать потоки между металлом и шлаком, поток между компонентами плавильной зоны и окружающей средой (воздухом), потоки между расплавом металла и внутренней частью шлакового купола (дуговым промежутком). Поток вещества из флюса в шлаковую ванну, как и рядом остальных потоков, автор пренебрегает.

Результаты применения математической модели предложенной А.А.Буки показывают, что марганец, алюминий и хром улетучиваются из расплава в воздух. Их потоки зависят от концентрации этих элементов в металле шва и окислов в шлаке. Зависимость потоков марганца, алюминия и хрома в воздух от снижения концентрации углерода в металле, сварочного тока и напряжения автором не обнаружены. Исследования, так

же не подтвердили поступления кремния в воздух.

Анализ физической модели сварки под флюсом представленной А.А.Буки показывает, что модель отличается довольно подробной детализацией. В ней наряду с попыткой описать поведение плазмы дугового разряда внутри шлакового купола, представлена схема появления в металле шва эндогенных включений и возникновения пористости шлаковой корки. Говорится о диссоциации соединений в дуговом промежутке и испарении шлака. Довольно интересно предположение о том, что шлаковый купол омывается плазменными потоками и существует встречный плазменный поток, как результат отражения основного потока от преграды.

В предлагаемой схеме отсутствует механизм образования "кратера" в основном металле, т.е. непонятно за счет чего происходит углубление дугового разряда в основной металл и его проплавление. Не учтена так же возможность "пробулькивания" [26] — выброса избыточного газа, который наиболее часто происходит в хвостовой части сварочной ванны и напрямую свидетельствует о наличии газового пузыря (газовой фазы).

В заключении рассмотрения данной физико-химической модели сварки под флюсом, необходимо отметить, что А.А. Буки вносит новый термин — "плавильная зона" в замен существующего — "реакционная зона" предложенным К.В. Любавским [19].

Некоторые уточнения в процесс формирования металла шва при сварке под керамическими и плавными флюсами вносит В.В. Головкин. На основании проведенных экспериментов показано, что форма проплавления определяется структурой флюса (рис. 4).

Основным объяснением изменения формы провара при переходе от плавного флюса к керамическому, аналогичного состава (рис. 4), по мнению В.В. Головкина, служит изменение распределения сил межфазного натяжения на границе раздела трех фаз, которое возникает из-за увеличения содержания в составе металла шва таких поверхностно активных элементов как кислород и сера. Если обычно потоки жидкого металла направляются из области с низким межфазным натяжением к областям с высоким натяжением, то при увеличении в составе расплавленного металла поверхностно активных элементов эти потоки сначала замедляются, а затем меняют свое направление на противоположное — от краев ванны к центру. В условиях сварки это приводит к узкому и глубокому провару (рис. 5). Это соответствует изменению в характеристиках потоков расплавленного металла в сварочной ванне. Направление потока меняется от центробежного

(радиального) к центростремительному (осевому). Более высокая интенсивность осевых потоков при сварке под керамическим флюсом способствует формированию узких швов с небольшим коэффициентом формы провара и очерчиванием линии сплавления шва с основным металлом в виде гиперболы. При сварке под плавным флюсом интенсивность радиальных потоков выше, чем при сварке под керамическим флюсом. Грибовидная форма сварного шва в поперечном сечении объясняется наличием на поверхности радиальных потоков металла, имеющего повышенную температуру по сравнению с металлом нижних слоев (рис. 4, 5).

Преобладание осевых потоков в ванне обуславливает движение перегретого сварочной дугой металла вдоль дна ванны, интенсивную теплоотдачу в этой зоне и вынос на поверхность уже охлажденного металла в хвостовой части. В том случае, когда в сварочной ванне преобладают радиальные потоки, перегретый металл растекается по ее поверхности, отдает тепло боковым стенкам и опускается в донную часть уже достаточно охлажденным (рис. 5).

Необходимо отметить, что еще одним объяснением изменения формы провара при переходе

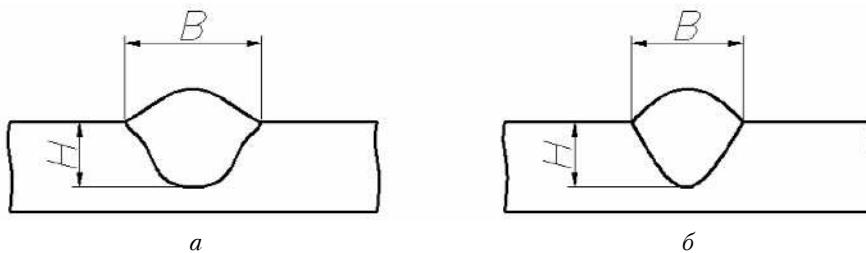


Рис. 4. Форма проплавления при однопроходной электродуговой сварке: а — под плавным; б — под керамическим флюсом [29]

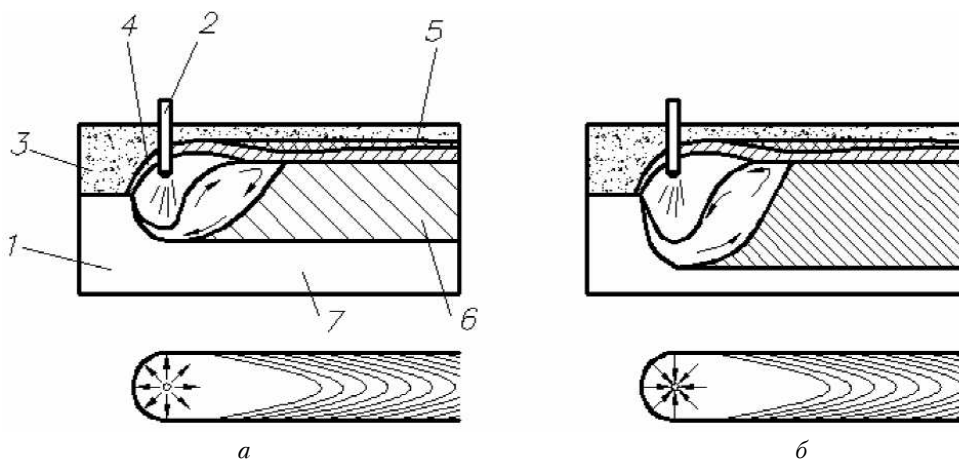


Рис. 5. Схема движения потоков расплавленного металла при сварке: а — с преобладанием радиальных потоков; б — с преобладанием осевых потоков. 1 — основной металл; 2 — проволока; 3 — сварочный флюс; 4 — шлаковая ванна; 5 — шлаковая корка; 6 — металл шва; 7 — сварочная ванна

от плавного флюса к керамическому, аналогичного состава может являться силовое воздействие дугового разряда на расплавленный металл сварочной ванны. Керамический флюс, который состоит из чистых, не переплавленных компонентов, содержит больше кислорода, который поступает в дуговой промежуток, в результате чего происходит обжиг сварочной дуги. Это, в свою очередь, приводит к увеличению глубины проплавления и снижению ширины шва (рис. 4).

Принципиально отличающуюся схему электродуговой сварки под флюсом предложил В.Г. Кузменко. В этой схеме выделено часть сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом (рис. 6).

В **зоне плавления металла и флюса** вследствие исходной подвижности зерен флюса (в отличие от монолитного металла) на передней кромке сварочной ванны возникает разрыв сплошности ее шлакового укрытия. Часть функций по защите сварочной ванны от воздуха обеспечивают инертные или малоактивные газы, образующиеся при нагреве флюсов. Эти газы так же создают избыточное давление в зоне дуги. Наиболее значимой для защиты от вредных газов является высокотемпературная реакция образования тетрафторида кремния (SiF_4). [16].

В **зоне действия дуги** ускоряется взаимодействие металла с оксидной составляющей шлака, в результате чего металл насыщается кислородом и соответствующими оксидобразующими элементами. При этом может происходить "захватывание" шлака металлом. В этой зоне, по мнению автора, происходит капельное плавление электродного и пленочное — основного металлов.

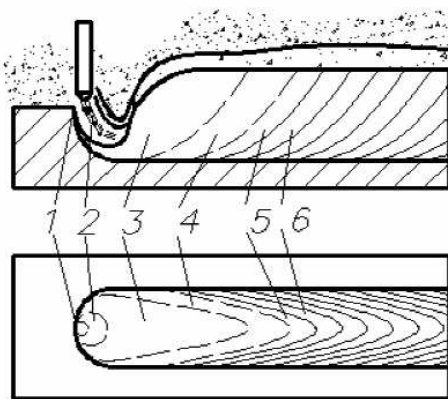


Рис. 6. Основные зоны сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом:
1 — плавления (нагрев) металла и флюса; 2 — действия дуги (нагрев и возмущение жидкого металла дугой);
3 — турбулентного течения металла; 4 — ламинарного течения металла; 5 — обездвиженного жидкого металла; 6 — твердого состояния металла (охлаждение металла и его кристаллизация); $T_{пл}$ - температура плавления металла; l — длина сварочной ванны [16,41]

В **зоне турбулентного течения металла** наблюдается падение температуры с последующим относительным замедлением темпа ее снижения, что обусловлено переносом тепла турбулентными потоками жидкого металла и шлака в направлении хвостовой части сварочной ванны, которые стимулируются действием высокоскоростных потоков газа и плазмы электрической дуги. С понижением температуры растворимость водорода и азота в металле сварочной ванны снижается, и эти газы стремятся выделиться из металла.

Кислород, азот, сера и фосфор образуют неметаллические включения, выделяющиеся в самостоятельную фазу как нитридные, оксидные, сульфидные и фосфидные включения, а также их комплексы. Появлению неметаллических включений предшествует процесс формирования зародышей. В этой зоне сварочной ванны оксидных включений образуется сравнительно больше, причем их абсолютное количество увеличивается при повышении содержания растворенного в металле кислорода.

В **зоне ламинарного течения металла** происходит дальнейшее снижение температуры и скорости течения металла. В связи с этим интенсивность его перемешивания уменьшается, что приводит к замедлению процессов взаимодействия со шлаком. Снижается также скорость удаления неметаллических включений из сварочной ванны за счет уменьшения скорости их переноса потоками металла к его межфазной поверхности контакта со шлаком. Тем не менее, образование неметаллических включений и выделение газов в этой зоне продолжают, что может стимулировать очищения жидкого металла от неметаллических включений в результате транспортировки последних газовыми пузырьками к поверхности раздела между металлом и шлаком.

В **зоне обездвиженного жидкого металла** происходит формирование выпуклости шва, его плавного перехода к основному металлу и формирования гладкой бездефектной поверхности. При этом предлагается рассматривать статические и динамические аспекты.

От статических характеристик металла и шлака, в частности межфазного натяжения, зависит характер сопряжения шва с основным металлом.

Динамические аспекты формирования шва определяются особенностями силового воздействия движущейся электрической дуги и последствиями ее влияния на поверхность сварочной ванны.

По мере перемещения дуги металл из жидкого состояния (сварочная ванна) переходит в фиксированное (сварной шов) состояние. При этом для получения качественной поверхности шва необходимо, чтобы к моменту кристаллизации жидкого

металла обеспечивалось его минимальное отклонение от равновесного положения.

В головной части сварочной ванны жидкий металл подвергается воздействию возмущающих факторов, таких, как давление электрической дуги, падение капель электродного металла, движение потоков, выделение газов и др. В результате влияния этих факторов происходит возмущение поверхности сварочной ванны и образование волн, перемещающихся к ее границам. Если при достижении границ сварочной ванны амплитуда волны достаточно велика, то при переходе металла из жидкого состояния в фиксированное, она образует на шве соответствующие искажения. При этом особое значение приобретает способность сварочных шлаков оказывать демпфирующее воздействие на сварочную ванну. В наибольшей степени такими свойствами обладают шлаки, которые сохраняют малую плотность и высокую вязкость в диапазоне температур существования сварочной ванны [40]. Наиболее полно этим требованиям соответствуют шлаки с высоким содержанием кремнезема и глинозема.

В зоне твердожидкого состояния металла шва происходит обогащение маточного раствора легкоплавкими компонентами и достижение высокой степени его пресыщения перед фронтом кристаллизации. Шлак, расположенный на поверхности твердеющего металла, из-за отсутствия непосредственного контакта с примесями не влияет на их перераспределение. Тем не менее, благодаря высокой теплоизолирующей способности и большой теплоемкости, он косвенно способствует очищению металла шва от неметаллической составляющей за счет увеличения протяженности и длительности существования сварочной ванны, а также образованию более благоприятной, чем при бесфлюсовых процессах, формы фронта ее кристаллизации.

С точки зрения металлургических процессов характеризующих сварку под флюсом В.Г. Кузменком представлены следующие соображения [16, 17, 18, 39, 40]:

- способность оксидов шлака отдавать металлу кислород усиливается в ряду CaO , K_2O , Na_2O , MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 , MnO , FeO ;

- наиболее существенный вклад в образование оксидных включений в металле шва вносят такие термически нестабильные и легко восстанавливаемые оксиды, как FeO , MnO и SiO_2 , даже при их относительно небольшом содержании во флюсе;

- образование неметаллических включений происходит в две стадии. Вначале образуются зародыши соединений первой группы с низким межфазным натяжением на границе с железом: FeO , MnO , FeS и MnS . Затем на поверхности ранее появившихся в расплаве железа включений

первой группы может происходить выделение оксидов второй группы — Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2 , CaO ;

- сфероидальные или компактные включения неправильной формы обычно представлены глиноземом, алюминатами, алюмосиликатами и образуются при отвердевании, когда температура плавления неметаллических включений больше, чем у металла. При обратном соотношении температур плавления включений и металла образуются пленочные включения на основе сульфидов, окисульфидов, силикатов железа и марганца. Их появление в металле шва часто связано с применением при сварке марганцево-силикатных флюсов;

- сварочная ванна в большей степени способна самоочищаться от алюминатных и алюмосиликатных включений при наличии на ее поверхности основных маловязких шлаков;

- значение плотности насыщения металла шва неметаллическими включениями при электродуговой сварке под флюсом составляет приблизительно $1 \cdot 10^8$ част./мм³ и увеличивается при повышении его загрязненности кислородом и другими примесями.

Анализируя данную схему необходимо отметить, что разрыв сплошности шлакового укрытия (купола) на передней кромки сварочной ванны возникает по мнению В.Г. Кузменком за счет подвижности зерен флюса. Функции по защите сварочной ванны от воздуха обеспечивают инертные или малоактивные газы, образующиеся при нагреве флюсов, при этом наиболее значимой для защиты от вредных газов является высокотемпературная реакция образования тетрафторида кремния (SiF_4). [16]. Многообразие зон сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом, выделяемых автором позволяют внести определенные уточнения в процесс образования оксидных включений. В то же время, сама реакционная зона практически не рассматривается. Соответственно отсутствует физико-химическая модель формирования состава металла шва.

В заключении необходимо обратить внимание на схему автоматической сварки под флюсом, которую приводят Г.И. Лашенко и Н.Н. Потапов [25, 42]. В этих схеме газовая фаза располагается в верхней части реакционной зоны сварки и контактирует у Г.И. Лашенко только с плазмой дуги и расплавленным флюсом (рис. 7, а), а у Н.Н. Потаповым и с расплавленным металлом ванны. При этом отмечается, что дуга горит под слоем флюса в пространстве газового пузыря, образующегося в результате выделения паров и газов в зоне дуги. Сверху пузырь ограничен пленкой расплавленного шлака, снизу сварочной ванной. Периодически образующиеся газы прорывают пленку расплавленного шлака и удаляются в атмосферу.

Данные схемы электродуговой сварки под флюсом являются вполне логичным продолжением схемы предложенной Е.О. Патеном [1], уточнение которой проводилось в работах И.И. Фрумина [10], К.В. Любавского [19], Г.Л. Петрова [32]. В тоже время, при сравнении данных схем с традиционными, обращает внимание, что взаиморасположение основных высоконагретых элементов внутри шлакового купола реакционной зоны сварки кардинально меняется. Так отдельным элементом в данной схеме выделена газовая фаза как составляющая газового пузыря. Схематически газовая фаза находится у Г.И. Лашенко непосредственно над дуговым разрядом, а у Н.Н. Потапова сразу за дуговым разрядом (рис. 7). С другой стороны газовая фаза ограничена участком расплавленного флюса и сварочной ванной (у Н.Н. Потапова). Это приводит к тому, что согласно рисунку 7, а, прямого взаимодействия газовой фазы 5 с металлом сварочной ванны 7 нет. Расплав флюса 4, в свою очередь, взаимодействует со шлаковой коркой 3, газовой фазой 5, расплавом металла на стадии сварочной ванны 7 и сварочным швом 8, т.е. закристаллизовавшимся металлом. Форму сварочной ванны, в этой схеме определяет плазма дугового разряда. Передняя часть реакционной зоны представляет собой шлаковую корку 3, частично газовую фазу 5, размер которой соизмерим с толщиной шлаковой корки, плазму дугового промежутка (дугу) и прослойку расплавленного металла (рис. 7). Основное отличие схемы, которую приводит Н.Н. Потапов (рис. 7, б) заключается в том, что газовая фаза взаимодействует не только с плазмой дуги и шлаком, а и металлической ванной. Соответственно форму сварочной ванны определяет не только плазма дугового разряда, а и давление в газовой фазе.

Детализация самого процесса сварки под флюсом в этих двух схемах отсутствует.

Если пренебречь возможностью нарушения шлакового купола в передней части реакционной зоны сварки (рис. 6), что в принципе является важным и принципиальным моментом при формировании физической модели сварки под флюсом, то она может выглядеть в соответствии с рисунком 8.

В данной схеме сознательно, жестко, не определена область дугового разряда. Кроме этого, передний фронт сварочной ванны является более пологим, чем в ряде других схем (рис. 1, 2, 5). Детализацию по переносу электродного металла, отдельным частичкам шлака, выделяющимся газам мы так же не приводим. Связано с тем, что для описания этих процессов требуется проведение тщательного анализа имеющихся экспериментальных данных полученных различными исследователями при непосредственном наблюдении за реакционной зоной при сварке под флюсом с помощью специальных методик. Приведенная классификация основных зон на рисунке 8 представлена по данным работы [16], хотя в ней имеются определенные отличия.

Необходимо отметить, что в зоне плавления металла и флюса 1, по видимому, все-таки возможно образование газообразных веществ и соединений, которые в результате наличия избыточного давления внутри шлакового купола могут вызвать нарушение его герметичности и сплошности причем в головной его части.

Заключение

Рассмотренные схемы электродуговой сварки под флюсом и их анализ показывает, что они имеют существенные отличия, вызванные различным расположением основных фаз внутри

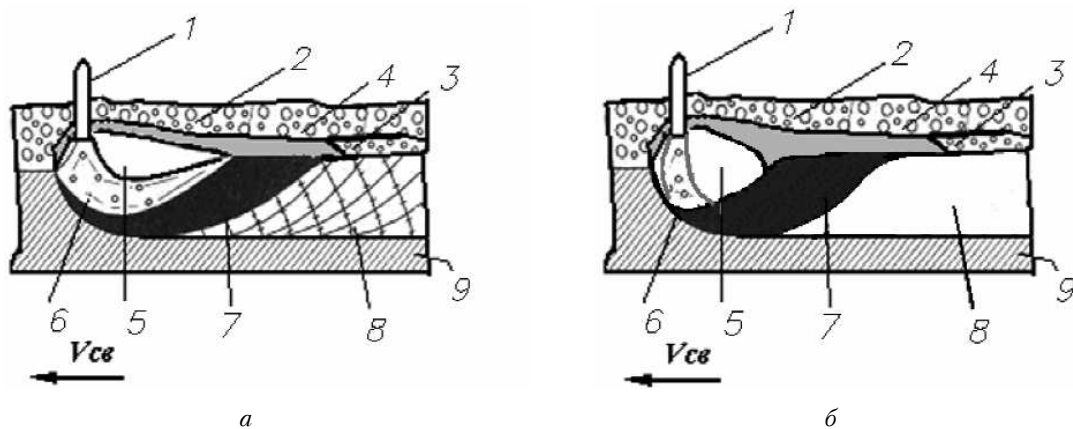


Рис. 7. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом приведенная Г.И. Лашенко [42], а и Н.Н. Потаповым [25]: 1 – электродная проволока; 2 – флюс; 3 – шлаковая корка, 4 – расплавленный флюс (расплав шлака); 5 – газовая фаза; 6 – дуга; 7 – сварочная ванна; 8 – сварной шов; 9 – основной металл

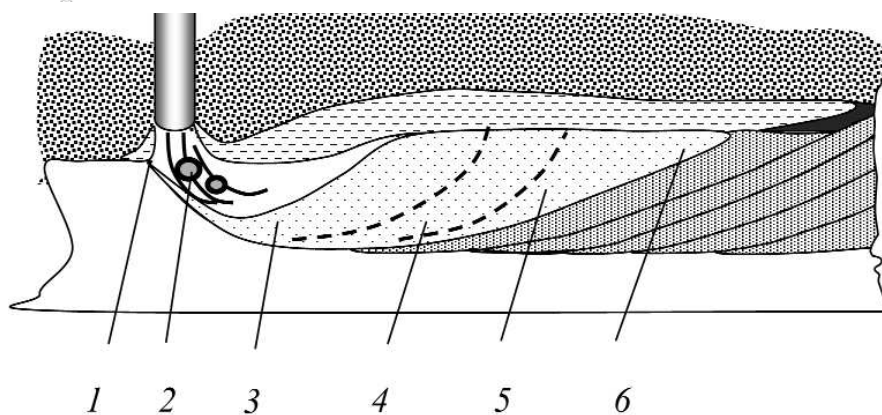


Рис. 8. Обобщенная схема сварки под флюсом и основные зоны:

1 – плавления металла и флюса; 2 – действия дуги; 3 – турбулентного течения металла; 4 – ламинарного течения металла; 5 – неподвижного жидкого металла; 6 – твердого металла

реакционной зоны сварки под флюсом и как следствие изменяющимся механизмом интерпретации их взаимодействия. Даже при использовании традиционных схем [1, 10, 19, 32, 25, 44] отличия в них весьма существенны и относятся к взаиморасположению газовой, шлаковой и металлической фаз после прохождения дугового разряда. Процессы в преддуговой период, также до конца не выяснены, что приводит к неопределенности в расположении электрода в реакционной зоне сварки. На динамические характеристики сварочной ванны существующей внутри шлакового купола, также имеются весьма различные представления.

Схема, предложенная в работах [16, 27] вообще кардинально отличается от традиционных, изменениями в формировании передней (головной) части реакционной зоны сварки, т.е. впереди дугового разряда. Условий развития взаимодействующих фаз после дугового разряда, в этой схеме, также довольно существенно изменены. Это относится как к процессам, которые происходят в расплавленной сварочной ванне, та и после ее кристаллизации.

Имеется определенная тенденция в развитии представлений о реакционной зоне сварки под флюсом, которая заключается в том, что сама схема сварки значительно усложняется за счет включения всех возможных компонентов, вследствие привлечения новых экспериментальных данных. Кроме этого наблюдается явная тенденция попытки структуризации газовой фазы, условия, формирования которой до конца невыяснены.

Вопросы влияния режима сварки на изменения в физической модели сварки под флюсом в существующих схемах вообще не рассматриваются.

В результате можно сформировать определенные приоритеты, на которые необходимо обратить особое внимание при дальнейшем анализе

имеющихся данных с целью создания современной физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом:

- взаиморасположение фаз в реакционной зоне сварки;
- особенности существования плазмы дугового разряда при сварке под флюсом;
- физико-химические особенности формирования фаз и их взаимодействия;
- физические условия формирования и существования ванны расплавленного металла и особенно шлакового купола;
- вопросы переноса электродного металла;
- наличие сплошности шлакового купола;
- влияние режима сварки на физико-химические процессы в реакционной зоне.

Литература

1. *Автоматическая электродуговая сварка.* Под ред. Е.О. Патона. – М.: Машгиз, 1953. – 396 с.
2. *Б.Е. Патон, А.М. Макара.* Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса. – Киев: АН УССР, 1944. – 93 с.
3. *Н.Г. Остапенко, Б.И. Медовар.* Исследование дуги, горячей под флюсом, с помощью рентгеновских лучей, "Автогенное дело" № 11, 1947 – С. 16–20.
4. *П.Г. Гребельник.* Рентгеноисследование процесса автоматической сварки под флюсом. "Автоматическая сварка", 1950. – № 6. – С. 18–29.
5. *Н.Г. Остапенко.* О влиянии сопротивления электрода на величину коэффициента плавления при сварке под флюсом // Сб. трудов по автоматической сварке под флюсом. Киев, 1948. – Ч.1 – С. 208–217.
6. *Б.Е. Патон.* Об оценке стабилизирующих свойств флюса для автоматической сварки. – Автомат. сварка, 1950. – № 2. – С. 85–89.



7. G. Tybus. Farbige Zeitlupenaufnahmen zur Beobachtung des Schweißbades beim UP-Schweißen. "Schweißtechnik", Berlin, 1957. — № 3.

8. И.К. Походня, Б.А. Костенко. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом, "Автоматическая сварка", 1965. — № 10.

9. Franz U. Der Werkstoffubergang und sein Einfluss auf die Metallurgie bei der UP-Schweissung. Die Arbeiten der V-ten Konferenz fur Schweisstechnik und Mrtallprufung. Timisoara, 1965.

10. И.И. Фрумин. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1961. — 422 с.

11. Л.А. Жданов, А.М. Сливінський, В.М. Коперсак, В.Т. Котик, В.Л. Коваленко. Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп'ютера. Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2004. — № 3. — С. 49–55.

12. 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.

13. В.Г. Кузьменко. Особенности нагрева флюса при электродуговой сварке в зависимости от ее скорости и рода тока // Автомат. сварка, 1980. — № 8. — С. 34–35.

14. В.Г. Кузьменко. Определение скорости движения металла и шлака. — Автомат. сварка, 1997. — № 10. — С. 21–25, 31.

15. В.Г. Кузьменко. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автомат. сварка, 1998. — № 3. — С. 14–19.

16. В.Г. Кузьменко. Оценка роли шлаков в различных сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом // Автоматическая сварка, 1998. — № 12. — С. 11–21.

17. В.Г. Кузьменко. К особенностям плавления флюса при сварке // Автомат. сварка, 2000. — № 11. — С. 60.

18. В.Г. Кузьменко. Термодинамические и структурные аспекты выбора составов флюсов для электродуговой сварки (Основы теории флюсов нейтрального типа) Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — Киев, 2001.

19. К.В. Любавский. Металлургия сварки плавлением: Справочник/ Под ред. Е.В. Соколова. — М.: Машгиз, 1960.

20. Б.Е. Патон. О размере электродных капель при сварке под флюсом. — Автомат. сварка, 1950. — № 4.

21. А.А. Ерохин. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: "Машиностроение", 1973. — 448 с.

22. В.В. Подгаецкий. Флюсы для дуговой и электрошлаковой сварки. — Киев: Наукова думка, 1976.

23. В.В. Подгаецкий, И.И. Люборец. Сварочные флюсы. — Киев: Техніка, 1984. — 167 с.

24. В.В. Подгаецкий, В.Г. Кузьменко. Сварочные шлаки. — Киев: Наукова думка, 1988. — 255 с.

25. 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.

26. В.Г. Кузьменко. Особенности плавления и отвердевания флюса при дуговой сварке. Сварочное производство, 1999. — №10. — С. 16–22.

27. Б.Н. Бадьянов. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Сварочное производство, 1999. — № 11. — С. 8–11.

28. Davis M., Bailey N. Properties of submerged arc fluxes. A fundamental study // Metal constructions, 1982. — № 14. — С 202–209.

29. В.В. Головки. Влияние физико-химических свойств флюса на движение жидкого металла в сварочной ванне. Автомат. сварка, 1994. — № 9–10. — С. 22–23.

30. Л.А. Жданов. Бесфтористые материалы для электродугового восстановления цилиндрических деталей малого диаметра и технология наплавки в потоке флюса. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Киев, 2001.

31. В.В. Головки. Взаимодействие металла со шлаком при сварке под агломерированными флюсами низколегированных сталей. Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук. — Киев, 2006.

32. Г.Л. Петров. Сварочные материалы. — Л.: Машиностроение, 1972. — 280 с.

33. Franz U. Vorgange in der Kaverne beim UP. — Schweißen Metallurgse der Schmelzschweissverfahren. — 4 Internationales Kolloqium. DDR. Magdeburg, 1964.

34. Теория сварочных процессов. Под редакцией В.В. Фролова — М.: "Высшая школа", 1988. — 559 с.

35. К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов. Теория сварочных процессов. — Киев: "Вища школа", 1976. — 424 с.

36. Технология электрической сварки металлов и сплавов. Под редакцией Б.Е. Патона — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.

37. В.М. Коперсак. Теорія процесів зварювання. Текст лекцій (в двох частинах). — 2-е видання. — Київ: НТУУ "КПІ", 2002. — 228 с.

38. А.А. Буки. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. М.: Машиностроение, 1991. — 287с.

39. И.И. Заруба. Плазменные потоки в сварочных дугах // Автомат. сварка, 1965. — № 10. — С. 1–5.

40. В.Г. Кузьменко. О характерных зонах сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом. // Автоматическая сварка, 1997. — № 5. — С. 24–27.

41. В.Г. Кузьменко. Влияние шлака на качество формирования поверхности шва // Автомат. сварка, 1985. — № 2. — С. 34–38.

42. Г.И. Лащенко. Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. — К.: "Екотехнология", 2006. — 384 с.