



## К ВОПРОСУ О ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ\*

В. Г. КУЗЬМЕНКО, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изложены результаты исследования характера плавления флюса при электродуговой сварке под флюсом с образованием шлакового пузыря. Установлено, что флюс плавится без образования шлакового пузыря газоплазменными потоками дуги в конвективном режиме теплообмена. Эти выводы подтверждены визуальными наблюдениями за горением электрической дуги под флюсом при использовании специальной методики. Кроме того, в последудговой зоне образуется протяженный шлейф жидкого шлака, который отделен от металла шва клиновидным слоем твердого шлака. Процесс образования шлаковой корки обусловлен высокими теплоизолирующими свойствами сварочных флюсов.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка под флюсом, шлаковый пузырь, теплофизика, теплопроводность флюсов, гидродинамика, визуальное наблюдение за горением дуги, схема процесса

Некоторые положения настоящей работы изложены в статьях, опубликованных в плане дискуссии в журналах «Автоматическая сварка» [1, 2] и «Сварочное производство» [3, 4].

Представление о процессе электродуговой сварки (рис. 1) сложилось в середине XX в. [5, 6] исходя из данных о просвечивании зоны горения дуги рентгеновскими лучами, на основе которых авторы пришли к выводу, что дуга функционирует в окружении шлакового пузыря, образующегося из плавящегося флюса.

К методике проведения исследований можно предъявить ряд замечаний: отсутствие предварительной идентификации различий между жидким шлаком и твердым флюсом в преддуговой зоне, фрагментарность отснятого материала вследствие краткости экспозиции съемок (0,02 с), сложность выделения тонкой шлаковой оболочки на фоне зерен флюса и другие факторы, ставящие под сомнение очевидность упомянутых выводов.

Особенностью столба электрической дуги является его способность выталкивать из своего пространства твердую и жидкую составляющие, при этом в объеме зерен флюса образуется полость. Возможно, она и была зафиксирована на полученных рентгеновских снимках. Вопрос состоит в том, успевает ли в процессе сварки в объеме флюса перед дугой возникнуть жидкая шлаковая прослойка, образующая вокруг дуги замкнутую оболочку? Этот вопрос существенно важен для оценки механизма защиты металла сварочной ван-

ны от влияния составляющих окружающей воздушной атмосферы.

Аналогичные исследования выполнялись и другими авторами [7–9]. Так, в работе [7] рентгеновское изображение выводили на электронно-оптическую трубку, что позволяло наблюдать процесс горения дуги в динамике, изучать перенос электродного металла как при сварке ручным электродом, порошковой проволокой, так и при сварке под флюсом. Тем не менее, на основании полученных результатов исследований не возможно однозначно определить наличие шлаковой оболочки при сварке под флюсом, особенно в преддуговой зоне. С целью установления истинного положения вещей нами проведены исследования, включающие как теоретические расчеты, так и специальные эксперименты.

Шлаковый пузырь в случае его реального существования можно рассматривать как некоторое динамически устойчивое образование, изолирующее зону горения дуги от окружающего воздуха,

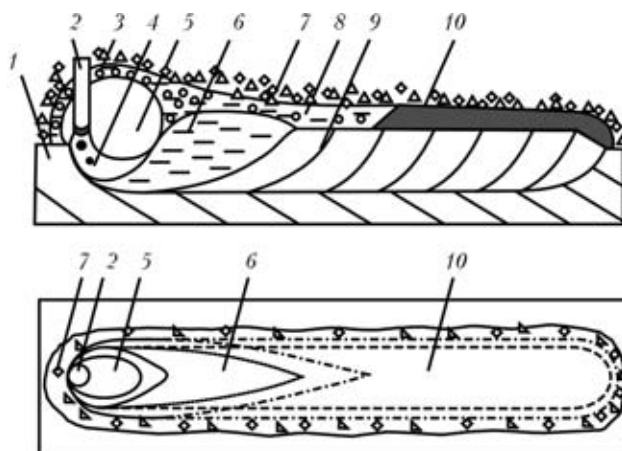


Рис. 1. Схема процесса электродуговой сварки под флюсом согласно существующим представлениям: 1 — основной металл; 2 — электродная проволока; 3 — шлаковый пузырь; 4 — зона горения дуги; 5 — кратер; 6 — сварочная ванна; 7 — флюс; 8 — жидкий шлак; 9 — шов; 10 — шлаковая корка

\* Статья публикуется по рекомендации технологического семинара, проведенного в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.



а также выполняющее функцию поставщика жидкого шлака, который расходуется на укрытие сварочной ванны. Шлаковый пузырь должен иметь способность возобновляться и в процессе сварки обеспечивать передачу достаточного тепла от дуги к твердому флюсу за пределами шлаковой оболочки. С помощью известного выражения [10, 11] определили время передачи тепла через переднюю стенку шлаковой оболочки, которое необходимо для доведения до температуры плавления некоторого объема твердого флюса:

$$\tau = \frac{Q\delta}{\lambda(t_{cr2} - t_{cr1})F},$$

где  $Q$  — тепло, которое следует затратить на нагрев до температуры плавления определенного объема флюса;  $\delta$  — толщина оболочки шлакового пузыря;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности шлака;  $t_{cr2} - t_{cr1}$  — разность температуры на поверхностях соответственно внутри и снаружи оболочки;  $F$  — площадь поверхности оболочки.

Такие теплофизические свойства шлаков, как удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность, принятые нами для расчетов, позаимствованы из литературных источников [12–24]. Значения толщины стенки шлакового пузыря и температуры на ее внутренней поверхности были заданы, а температура на наружной поверхности пузыря принята равной температуре плавления флюса (1200 °С). Для внутренней поверхности стенки шлакового пузыря принята температура, примерно равная температуре кипения шлака (3000 °С).

Как показали расчеты, значения скорости восстановления оболочки шлакового пузыря перед движущейся дугой (скорости смещения изотермы плавления флюса) (рис. 2) на 3–4 порядка ниже реальной скорости сварки, что ставит под сомнения вероятность образования жидкой шлаковой стенки перед дугой в соответствующем сварочном процессе.

Существование шлакового пузыря при сварке под флюсом возможно при наличии достаточно тонкого равновесия между давлением газов в его объеме, с одной стороны, и межфазным (поверхностным) натяжением шлака и массы флюса, с другой, а также при отсутствии значительных возмущающих факторов в зоне образования шлакового пузыря. Рассмотрим насколько возможно это в реальном сварочном процессе.

При сварке дуга оказывает на кромку плавящейся пластины и жидкий металл сварочной ванны сильное давление, что вызвано ее мощными газоплазменными потоками, скорость которых по разным данным составляет от 75 до 2200 м/с [25–34]. В результате отражения от плавящейся кромки свариваемого металла эти потоки изменяют

свое направление в сторону, противоположную движению дуги, при этом вытесняется значительная доля жидкого металла сварочной ванны и образуется кратер. Еще более интенсивно газоплазменные потоки вытесняют жидкий шлак, поскольку его плотность значительно меньше, чем у металла. Подтверждением этому служат полученные нами ранее методом индикации [1, 3] данные о характере смещения металла и шлака после сварки. Именно в первый момент контакта с дугой металл и шлак приобретают максимальную скорость. Наличие мощного возмущения металла и шлака, возникающего в результате воздействия дуги, препятствует образованию шлакового пузыря при рассматриваемом способе сварки в связи со смещением с большой скоростью его опорной зоны, что подтверждается данными исследований распределения жидкого шлака вдоль сварочной ванны, полученными путем выброса ее содержимого в специальный коллектор с равномерно расположенными секциями [1, 3]. На рис. 3 показано распределение шлака вдоль сварочной ванны при использовании трех стандартных флюсов марок АН-60, АН-26С и АН-15М, полученное с помощью описанной выше методики. Как следует из результатов эксперимента, сварочный шлак распределяется вдоль зоны сварки неравномерно.

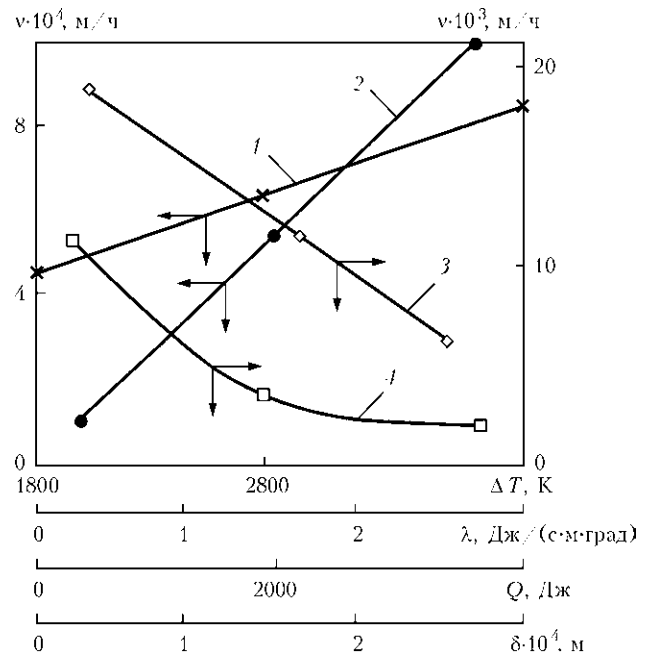


Рис. 2. Изменение скорости восстановления оболочки шлакового пузыря  $v$  в преддуговой зоне при электродуговой сварке под флюсом в зависимости от теплофизических характеристик: 1 — градиент температур  $\Delta T(t_{cr2} - t_{cr1})$  (толщина оболочки  $\delta = 2$  мм; теплосодержание шлака объемом  $1 \times 1 \times 2$  мм  $Q = 1177$  Дж;  $\lambda = 1,5$  Дж/(с·м·град)); 2 — коэффициент теплопроводности шлака  $\lambda$  ( $\delta = 2$  мм;  $Q = 1177$  Дж шлака указанного объема;  $\Delta T = 2300$  К); 3 — теплосодержание шлака  $Q$  указанного объема ( $\delta = 2$  мм;  $\lambda = 2$  Дж/(с·м·град));  $\Delta T = 2300$  К); 4 — толщина оболочки шлакового пузыря  $\delta$  ( $Q = 1177$  Дж шлака указанного объема;  $\Delta T = 2300$  К;  $\lambda = 1,5$  Дж/(с·м·град))

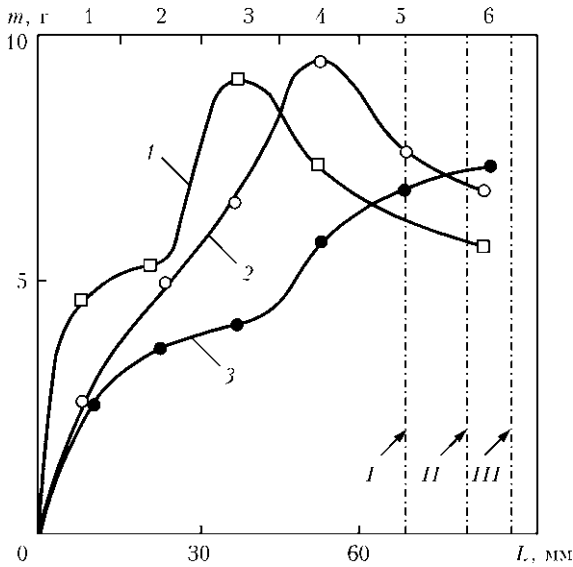


Рис. 3. Распределение массы  $m$  шлака по длине  $L$  сварочной ванны при электродуговой сварке с использованием флюсов марок АН-60 (1), АН-26С (2) и АН-15М (3), установленное путем опрокидывания ее содержимого в коллектор с карманами 1–6, равномерно размещенными вдоль сварочной ванны, и последующего взвешивания шлака (стрелки — границы сварочной ванны при применении указанных марок флюсов в последовательности, соответствующей обозначенному ряду I–III)

Значительная его часть оттесняется дугой в хвостовую часть сварочной ванны, а в ее головной части имеет место явно выраженная тенденция к снижению массы жидкого шлака по направлению к кромке плавящегося металла. Для получения более ясной картины аналогичные эксперименты проводили с целью контроля присутствия жидкого шлака на передней кромке сварочной ванны, при этом использовали пониженное напряжение дуги (21 В), что позволило ограничить объем плавящегося флюса, маскирующего результаты эксперимента. На рис. 4 хорошо видно, что на кромке перед плавящимся металлом сварочной ванны жидкий шлак отсутствует (обоз-

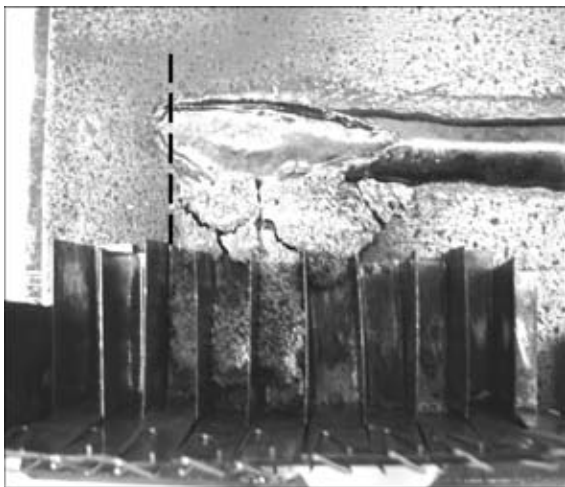


Рис. 4. Распределение расплавленного шлака вдоль сварочной ванны при электродуговой сварке после удаления нерасплавившегося флюса и шлаковой корки (фаза эксперимента)

начено штриховой линией), его нет и на некотором участке головной части сварочной ванны, где горит дуга. Это подтверждают кривые, построенные по данным взвешивания содержимого каждого из карманов коллектора (рис. 5, а). Таким образом, исследования распределения шлака вдоль сварочной ванны не показали его присутствия на передней кромке сварочной ванны, что по сути исключает возможность существования шлакового пузыря при электродуговой сварке под флюсом.

С целью выявления наличия шлакового пузыря при электродуговой сварке под флюсом нами проведен еще один эксперимент. Для этого выполнены отдельные наплавки, в которых осуществляли постепенное с 25 мм (полное укрытие дуги), а затем миллиметр за миллиметром снижение уровня засыпки флюса. Все этапы эксперимента фиксировались с помощью видеокамеры. Предполагалось, что на каком-то уровне засыпки флюса можно будет увидеть пульсирующий купол шлакового пузыря. Однако несмотря на монотонное снижение толщины слоя флюса на отснятом видеоматериале не удалось зафиксировать этот момент. Наблюдали только обнажение дуги без образования шлакового пузыря, и наоборот, — проседание засыпки флюса в зоне горения дуги, вызванное образованием в металле кратера, уменьшением объема флюса при плавлении и выборо-

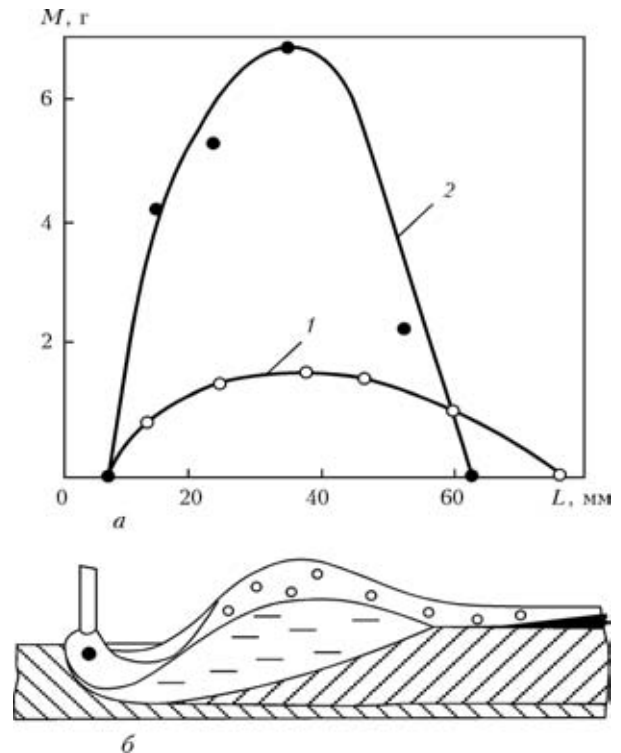


Рис. 5. Кривые распределения массы  $M$  жидких шлака (1) и металла (2) вдоль сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом, полученные путем использования усовершенствованной методики опрокидывания сварочной ванны и контроля массы объектов (а), схема указанного процесса (б)



сом шлака дугой в направлении хвостовой части сварочной ванны.

Для более убедительного подтверждения отсутствия шлакового пузыря нами разработана методика, обеспечивающая возможность визуального наблюдения за зоной горения дуги непосредственно в процессе электродуговой сварки под флюсом (рис. 6). При этом в качестве прозрачного экрана и одновременно образующего шлак материала использовали оконное стекло. Методика разработана с учетом основных положений тепловых и гидродинамических исследований, проведенных нами ранее. При этом оценивали две альтернативные точки зрения. Согласно первой, если образование шлакового пузыря в процессе сварки имеет место, то происходит плавление стекла, образование из его расплава оболочки вокруг дуги и соответственно ее экранирование. В противном случае стекло плавится в последующем пространстве, экранирование дуги не происходит и ее непосредственно можно наблюдать. Результаты экспериментов в виде последовательных во времени фаз горения дуги при электродуговой сварке под флюсом приведены на рис. 7. При изучении отснятого материала можно заключить, что экранирование дуги в процессе сварки не происходит, дуга хорошо просматривается на протяжении всего процесса сварки, шлаковый пузырь вокруг нее не образуется. Жидкий шлак не поднимается выше уровня горячей дуги, а концентрируется на поверхности сварочной ванны. На рис. 7 это хорошо видно по яркой полоске (шлейфу) горячего шлака в послекратерной зоне сварочной ванны. Этим подтверждаются отсутствие шлаковой защиты кратерной зоны сварочной ванны и существенная роль газовой защиты. В свое время указанное обстоятельство стало предметом дискуссии [35–37] и послужило основой для разработки нами нового класса поверхностно-фторированных сварочных флюсов с содержанием фтора в поверхностном слое их зерен 0,5...3,0 мас. %. Такие флюсы, даже пористые и основного типа, отличаются низкой склонностью к гидратации, высокой стойкостью к образованию пористости металла шва от ржавчины и улучшен-

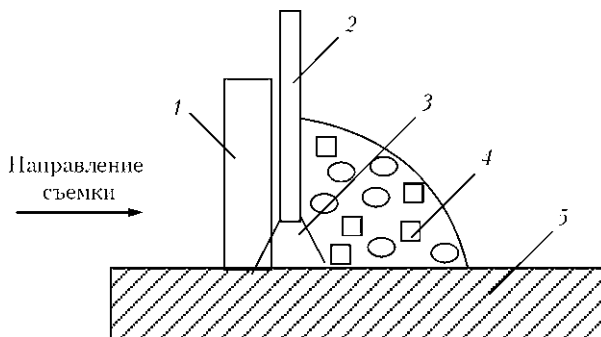


Рис. 6. Схема эксперимента по визуальному наблюдению процесса горения дуги при электродуговой сварке под флюсом: 1 — стекло оконное; 2 — электрод; 3 — электрическая дуга; 4 — флюс; 5 — стальная пластина

ными санитарно-гигиеническими характеристиками при сварке [38–40].

Для получения полной картины процесса электродуговой сварки под флюсом нами исследовались особенности остывания и отвердевания сварочного шлака в последующей зоне [3]. В отличие от общепринятой схемы процесса сварки (см. рис. 1) установлено наличие протяженной области жидкого состояния шлака, который выходит далеко за пределы сварочной ванны. Эти данные получены в результате применения традиционной методики опрокидывания сварочной ванны [3]. Большое влияние на скорость остывания и конфигурацию зон затвердевшего и жидкого шлака оказывают его высокие теплоизолирующие свойства. В этом случае происходит преимущественно теплоотвод в металл, который связан с изменением температурного поля, обусловленным перемещением электрической дуги вдоль оси шва. При этом шлак отвердевает прежде всего в тех точках на поверхности металла шва, где его температура снижается до температуры плавления шлака. По мере удаления дуги происходит дальнейшее постепенное снижение температуры и монотонное наращивание толщины твердеющего шлака с соблюдением и тепловой изоляцией шлейфа, расположенного выше объема жидкого шлака. Новая схема процесса электродуговой сварки под флюсом с учетом особенностей остывания шлака в последующей зоне, представленная на рис. 8,



Рис. 7. Три последовательных фрагмента фаз горения дуги при электродуговой сварке под флюсом, полученные посредством эксперимента (см. рис. 6) (процесс сварки происходит слева направо)

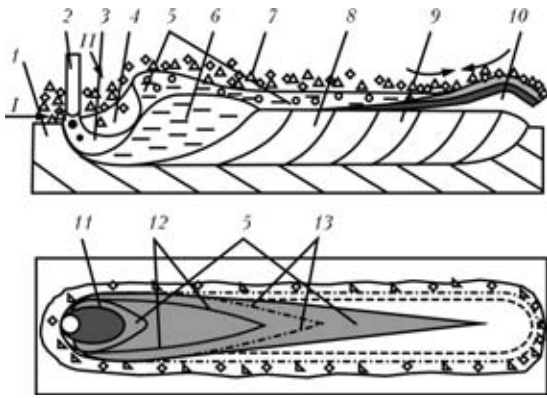


Рис. 8. Уточненная схема процесса электродуговой сварки под флюсом: 1 — основной металл; 2 — электродный металл; 3 — факел дуги; 4 — кратер; 5 — жидкий шлак и его протяженный шлейф; 6 — сварочная ванна; 7 — флюс; 8 — сварной шов; 9 — стекловидный, клиновидной формы, слой затвердевшего шлака; 10 — кристаллический слой затвердевшего шлака; 11 — зона кратера, не укрытая жидким шлаком; 12, 13 — линия изотермы плавления соответственно флюса и шлака (I, II — пути попадания в зону дуги флюса)

позволяет объяснить не рассматриваемый до настоящего времени механизм отвердевания флюса при электродуговой сварке. Значительная масса перегретого, медленно остывающего шлака над сварочной ванной служит ее тепловой надставкой, которая увеличивает продолжительность времени существования металла шва в жидком состоянии и способствует его дегазации. Большой объем жидкого шлака над твердеющим и затвердевшим металлом является резервуаром, который усваивает газы, выделяющиеся из металла шва. Благодаря наличию эластичной клинообразной пленки шлака на поверхности твердеющего металла шва возможно применение при электродуговой сварке флюсов с более высокой, чем у свариваемого металла, температурой плавления. Этим также объясняется иногда появление пористости в нижней части шлаковой корки при интенсивном газовыделении из металла, которая не достигает ее поверхности. Различие в скорости остывания примыкающего ко шву слоя шлака и вышерасположенного слоя приводит к существенным отличиям в их строении. Слой шлака, контактирующий с поверхностью шва, остывает быстрее и образует стекловидную структуру, в то время как слой шлака, расположенный выше, благодаря его теплоизоляции полностью или частично закристаллизован. Он имеет значительно больший коэффициент термического сжатия, чем стекловидный слой шлака, что приводит к изгибанию этой двухслойной структуры и ее самоотделению от остывающего шва (рис. 8). Особенно эффективен такой механизм отделимости шлаковой корки при использовании высококремнистых сварочных флюсов.

## Выводы

1. Методика просвечивания зоны горения дуги рентгеновскими лучами при электродуговой сварке под флюсом, использованная в работах [5, 6], не дает достаточных оснований для подтверждения факта существования шлаковой оболочки вокруг дуги, особенно в ее преддуговой зоне.

2. Использование общего уравнения теплопроводности и закона Фурье в приложении к одномерной задаче при расчетах скорости передачи тепла от дуги через оболочку к флюсу преддуговой зоны в зависимости от теплофизических характеристик шлака, градиента температур и толщины оболочки шлакового пузыря показали, что скорость восстановления оболочки (скорость смещения изотермы плавления флюса) на 3–4 порядка ниже реальной скорости сварки.

3. Вследствие крайне малой скорости восстановления преддуговой составляющей оболочки плавление флюса через образование шлакового пузыря при электродуговой сварке не происходит. В реальных условиях сварки дуга накатывается на флюс, захватывает его и плавит под воздействием собственных газоплазменных потоков в более энергетически эффективном конвективном режиме.

4. Конфигурация зон затвердевшего и жидкого шлака в последдуговой зоне и их температура при электродуговой сварке под флюсом определяются отводом тепла в металл и вследствие высоких теплоизолирующих свойств флюса, сопровождаются образованием протяженного жидкого шлакового шлейфа, отделенного от металла шва клиновидным слоем затвердевающей шлаковой корки.

5. Вследствие изменения скорости охлаждения шлака образуется двухслойная структура шлаковой корки (возле шва — стекловидная, выше — кристаллическая), при дальнейшем ее остывании различия в значениях коэффициента термического сжатия приводят к изгибанию шлаковой корки, что способствует ее отделимости от металла шва.

1. Кузьменко В. Г. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1998. — № 3. — С. 14–19.
2. Кузьменко В. Г. К особенностям плавления флюса при электродуговой сварке // Там же. — 2000. — № 11. — С. 60.
3. Кузьменко В. Г. Особенности плавления и отвердевания флюса при электродуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1999. — № 10. — С. 16–22.
4. Бадьянов Б. Н. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Там же. — 1999. — № 11. — С. 8–11.
5. Остапенко Н. Г., Медовар Б. И. Исследование зоны дуги, горящей под флюсом с помощью рентгеновских лучей // Автоген. дело. — 1947. — № 11. — С. 16–20.
6. Гребельник П. Г. Рентгеноисследование процесса автоматической сварки под флюсом // Автомат. сварка. — 1950. — № 6. — С. 18–29.



7. Походня И. К. Метод исследования процесса плавления и переноса электродного металла при сварке // Там же. — 1964. — № 2. — С. 1–10.
8. Исследование сварочной дуги, горячей под флюсом, с помощью импульсного рентгеновского аппарата / Л. А. Гобарев, А. Г. Мазель, И. А. Шмелева, К. К. Хренов // Там же. — 1973. — № 2. — С. 69–70.
9. Eichhorn F., Dilthey U. High-speed X-ray photography for submerged arc welding // Metal Construction and British Welding J. — 1971. — 3, № 12. — P. 453–456.
10. Касаткин А. Г. Процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1973. — 755 с.
11. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982. — 519 с.
12. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 286 с.
13. Литовский Е. Я., Пучкелевич Н. А. Теплофизические свойства огнеупоров. — М.: Metallurgy, 1982. — 149 с.
14. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неорганических материалов. — Л.: Энергия, 1973. — 333 с.
15. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968. — 464 с.
16. Чеховский В. Я., Улащик А. Н. Теплопроводность шлаков в твердом и расплавленном состояниях // Теплофиз. высоких температур. — 1987. — 5, № 5. — С. 924–928.
17. Явойский Я. И. Теория процессов производства стали. — М.: Metallurgy, 1967. — 781 с.
18. Сталеплавильное производство. — М.: Metallurgy, 1964. — Т.1. — 527 с.
19. Определение теплопроводности шлаковых расплавов посредством модифицированного метода лазерного пучка / Sakura Toshikary, Emi Toshikiko, Ohata Hiromichi, Wasida Yoshio // Нихон Киндзоку гаккайся. — 1982. — 46, № 12. — С. 1131–1138.
20. Егоров В. Н., Кондратенков В. И., Килессо В. С. Теплофизические свойства некоторых стекол и ситаллов // Теплофиз. высоких температур. — 1972. — № 5. — С. 95–99.
21. Серебренников Н. И., Гельд П. В. Энтальпия и температура плавления шлаков алюмотермического производства некоторых ферросплавов // Изв. вузов. Сер. Цвет. металлургия. — 1968. — № 4. — С. 39–44.
22. Маурах М. А., Митин Б. С. Жидкие тугоплавкие окислы. — М.: Metallurgy, 1979. — 287 с.
23. Вайсбурд С. Е., Зедина И. Н. Тепловые свойства некоторых силикатов в жидком состоянии // Физическая химия расплавленных шлаков. — Киев: Наук. думка, 1970. — С. 80–85.
24. Бобылев И. Б., Анфилогов В. Н. Метод расчета плотности расплавленных шлаков // Металлы. — 1983. — № 4. — С. 37–44.
25. Ерохин А. А. Силовое воздействие дуги на расплавляемый металл // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 21–26.
26. Чигарев В. В., Щетинин С. В. Распределение давления сварочной дуги // Там же. — 2001. — № 9. — С. 9–12.
27. Суздаев И. В., Явно Э. И. Прибор для исследования характера распределения силового воздействия сварочной дуги // Свароч. пр-во. — 1981. — № 3. — С. 37–38.
28. Ковалев И. М., Кричевский Е. М., Львов В. Н. Влияние движения металла в сварочной ванне на устойчивость дуги и формирование шва // Там же. — 1974. — № 11. — С. 5–7.
29. Мечев В. С. Давление сварочной дуги на расплавленный металл // Там же. — 1983. — № 9. — С. 8–10.
30. Потехин В. П. Роль давления сварочной дуги в образовании подрезов // Там же. — 1986. — № 8. — С. 38–39.
31. Wienecke R. Uber physikalische Vorgange in Lichtbogen // Schweißen und Schneiden. — 1957. — 9, № 9. — S. 428–434.
32. Петруничев В. А. Давление дуги большой мощности на сварочную ванну // Свароч. пр-во. — 1958. — № 7. — С. 14–17.
33. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 334 с.
34. Небылицын Л. Е., Ленивкин В. А., Дюржеров Н. Г. Определение параметров плазменной струи при сварке плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1976. — № 2. — С. 8–10.
35. Любавский К. В., Тимофеев М. М. Влияние колебаний состава высокомарганцевого флюса на его свойства // Автоген. дело. — 1951. — № 6. — С. 5–9.
36. Кирдо И. В., Подгаецкий В. В. О влиянии флюсов на пористость автоматного шва, вызванную ржавчиной // Тр. по автоматической сварке под флюсом. — 1949. — № 6. — С. 36–62.
37. Подгаецкий В. В., Новикова Т. П. О выделении фтористого кремния при нагреве флюса в процессе сварки и при сушке // Автомат. сварка. — 1960. — № 6. — С. 19–22.
38. Кузьменко В. Г., Гузей В. И. Гидратация флюсов с локально измененным химическим составом зерен // Там же. — 2004. — № 6. — С. 44–46.
39. Кузьменко В. Г., Гузей В. И. Порообразование в металле шва при сварке под флюсом с поверхностным насыщением зерен фтором // Там же. — 2005. — № 2. — С. 16–20.
40. Кузьменко В. Г., Гузей В. И. Санитарно-гигиенические характеристики сварочных флюсов с локально измененным химическим составом зерен // Там же. — 2006. — № 2. — С. 41–43.

Results of investigation of the nature of flux melting in electric submerged-arc welding with slag bubble formation are described. It is established that in electric-arc welding the flux melts without formation of a slag bubble by the gas-plasma flows of the arc in the convective heat exchange mode. The conclusions are confirmed by visual observations of arcing in submerged-arc welding using a procedure specially developed for this purpose. Also established is formation of an extended plume of liquid slag in the post-arc zone, which is separated from the weld metal by a wedgelike layer of solid slag. The process of slag crust formation is also due to high heat-insulating properties of welding fluxes.

Поступила в редакцию 29.11.2010