

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ФЛЮСА ДУГОЙ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, **Б. И. НОСОВСКИЙ**, канд. техн. наук, **И. В. ТАРАСЕНКО**, **И. С. ПСАРЕВА**, инженеры (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Проанализированы представления о плавлении флюса при электродуговой сварке тепловым излучением столба дуги. Экспериментально установлено, что основное тепловое воздействие осуществляется формирующимся в горячей дуге факелом. Одновременно наблюдается и его силовое воздействие, проявляющееся формированием в шлаке потоков, которые переносят тепло от факела к периферийным зонам.

Ключевые слова: дуговая сварка, столб и факел дуги, плавление флюса, сварочная ванна

В настоящее время дуговая сварка под флюсом является одним из наиболее распространенных (в промышленном производстве и ремонте) технологических процессов соединения конструктивных элементов и нанесения покрытий. При этом качество сварных соединений в значительной мере определяется условиями и характером плавления флюса.

Существующая более пятидесяти лет теория плавления флюса [1] основывается на предположении об основном энергетическом вкладе в этот процесс излучения столба дуги. Тогда же был отмечен ряд несоответствий между теоретическими предпосылками и практикой. В частности, наблюдается отсутствие связи между температурой столба дуги и относительной массой шлака, в то время, как известно, что теплоотдача излучением пропорциональна четвертой степени температуры излучения. В литературе были опубликованы данные о том, что увеличение сварочного тока с 300 до 800 А, повышающее температуру столба дуги на 750 °С, приводит не к возрастанию, а значительному уменьшению относительной массы шлака. Рост напряжения дуги, практически не влияющий на ее температуру, вызывает существенное приращение эффективности плавления флюса. Позднее была показана роль в этом процессе металла сварочной ванны [2]. Дискуссия о характере и физике плавления флюса продолжается до сих пор [3, 4], что свидетельствует об актуальности этой темы и ее недостаточной изученности.

Следует отметить, что на плавление флюса влияют несколько компонентов, сопутствующих процессу дуговой сварки: дуга; нагретый и расплавленный электродный и основной металлы; протекающий через жидкий шлак ток шунтирования. В предлагаемой работе сделана попытка определить роль дуги в плавлении флюса и оценить вклад от-

дельных ее составляющих. Первое возможно при условии исключения из этого процесса сварочной ванны. В связи с этим проведены эксперименты по плавлению флюса АН-60 косвенной дугой, горячей между неплавящимися графитовыми электродами диаметром 8 мм. Питание дуги проводили от сварочного выпрямителя ВДУ-1201 на режиме с жесткой вольт-амперной характеристикой. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. При возбуждении дуги ($U_d = 30... 31$ В, $I_d = 120... 150$ А) между электродами 1 и 2 было отмечено наличие, кроме ее столба (ядра) 3, также факела 4, протяженность которого составляла 25... 30 мм при длине столба дуги, на порядок меньшей.

Разделение дуги на ядро и факел описано в работах [5, 6], где показано, что скорости потоков в ядре на один порядок выше, чем в факеле, а сам факел более подвижен, чем ядро. При этом оба они располагались между электродами. В проведенных авторами экспериментах при горении дуги между графитовыми электродами факел не совпадал с ее ядром, а исходил из катодной области в пространство (рис. 1). Фотография дуги, сделанная через темное стекло, подтверждает присутствие такого факела (рис. 2).

Для оценки природы факела было выполнено его электрическое зондирование. В качестве зондов 5 (рис. 1) использовали нихромовую проволоку диаметром 0,8 мм. Измерение распределения потенциала осуществлялось с помощью вольтметров PV1... PV3. Было установлено, что разность потенциалов вдоль длины факела $U_{PV1} = 0$, между факелом и анодом $U_{PV2} = 25... 26$ В, а между факелом

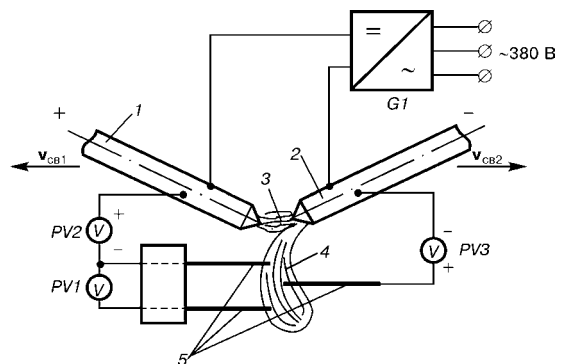


Рис. 1. Схема зондирования электрической дуги постоянного тока, горячей между графитовыми электродами (обозначения см. в тексте)

Носовский Борис Иванович — доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

Тарасенко Ирина Викторовна — выпускница ПГТУ 1996 г., аспирантка кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

Псарева Ирина Сергеевна — выпускница ПГТУ 1994 г., аспирантка кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

© С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. В. Тарасенко, И. С. Псарева, 2001

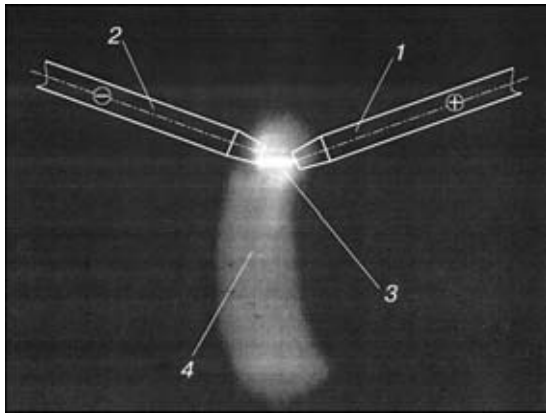


Рис. 2. Электрическая дуга, горящая между графитовыми электродами (обозначения те же, что и на рис. 1)

и катодом $U_{PV3} \approx 6$ В. При изменении напряжения на дуге от 30 до 50 В указанное катодное напряжение колебалось в диапазоне 6...8 В. Вероятно, напряжение U_{PV3} соответствует катодному падению напряжения.

Если такой факел существует при дуговой сварке под слоем флюса и имеет достаточный запас энергии, то он также может участвовать в плавлении флюса. Наличие при дуговой сварке факела, прорывающегося через флюс, в хвостовой части сварочной ванны отмечено в работах [7, 8].

Для оценки энергетических характеристик факела дуги проведен следующий эксперимент. Медную пластину 1 (рис. 3) массой 176,6 г и размерами 9,5×30×68 мм, расположенную в металлическом кожухе 2 и теплоизолированную от него и окружающей среды с помощью асбестовой прослойки 3, помещали на фиксированный отрезок времени (5...6 с) под факел дуги 4 на расстоянии примерно 5 мм от ее ядра 5. Энергетические параметры дуги были следующими: $U_d = 30$ В, $I_d = 100$ А. При этом факел 4 касался пластины 1. По прошествии этого отрезка времени пластину быстро выводили из-под факела и накрывали сверху теплоизоляционной крышкой. Температуру после выравнивания по всему объему пластины фиксировали с помощью термометры 6 и прибора 7.

Теплоемкость вещества описывается выражением [9] $c = Q / (M)\Delta T$, где Q — количество тепла, кДж; M — масса нагреваемого тела, кг; ΔT — изменение температуры нагреваемого тела, К. Зная, что для меди $c = 0,39$ Дж/(кг·К), можно рассчитать количество тепла, затрачиваемого на увеличе-

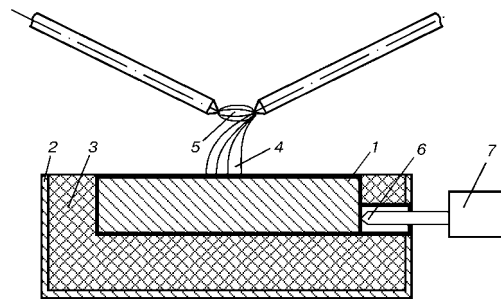


Рис. 3. Схема измерения энергетических характеристик факела дуги (обозначения см. в тексте)

ние температуры медной пластины, в проведенных экспериментах оно составило 4,0...4,2 кДж. При электрической мощности дуги, равной 3 кВт, и времени горения 5...6 с количество выделенной в ней энергии составило 15...18 кДж. Таким образом, сконцентрированная в факеле энергия составляет примерно 20...25 % энергии, затраченной при горении дуги, что свидетельствует о достаточно высокой тепловой эффективности этой составляющей дугового процесса.

При горении дуги над флюсом его нагрев обусловлен излучением дуги и ее факела. Под слоем флюса к этим факторам добавляется непосредственное воздействие на флюс столба (ядра) дуги.

Для определения непосредственного влияния на флюс ядра и факела дуги выполнены эксперименты по схемам, приведенным на рис. 4. Дугу 1 зажигали над флюсом 2 (рис. 4, а) и касались факелом 3 его поверхности при неподвижном источнике тепла. При этом расстояние H от поверхности флюса до ядра дуги составляло 3 мм. Факел интенсивно расплавлял флюс, осуществляя на жидкий шлак также и силовое воздействие. В шлаковой ванне под этим воздействием отмечено формирование потоков, которые, увлекая с периферии новые порции флюса, транспортировали их к центру, а также вглубь расплавленной области шлака. Таким образом, образующиеся при сварке потоки не только транспортируют тепло, но и перемещают флюс, вовлекая новые его порции в реакционную зону и интенсифицируя его расплавление.

Последующие эксперименты по расплавлению флюса производили с движущейся дугой. Скорость ее перемещения относительно флюса составляла 30 м/ч, а вектор скорости перемещения (кроме отдельно оговоренных случаев) был направлен по нормали к плоскости чертежа (рис. 4). В процессе экспериментов изменяли расстояние H от поверхности флюса до дуги при расположении дуги над его поверхностью и под флюсом. Длительность перемещения (горения) дуги во всех опытах составляла 10 с. По окончании опыта застывший после расплавления шлак взвешивали. Результаты экспериментов приведены на рис. 5, из которого следует, что при расположении дуги над флюсом, т. е. при положи-

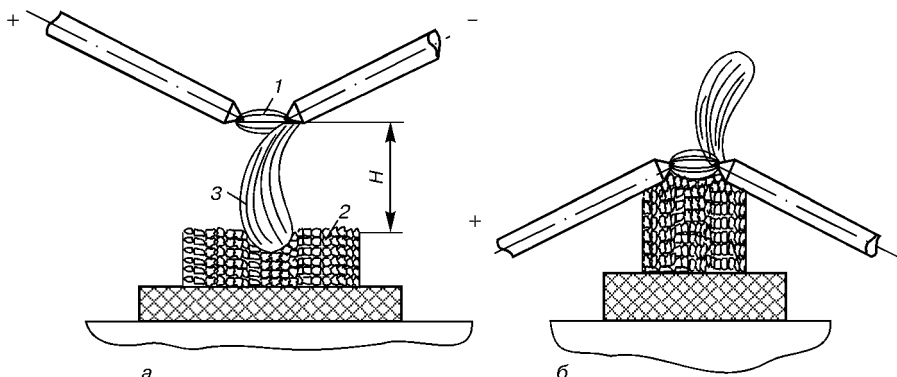


Рис. 4. Схемы плавления флюса дугой (обозначения см. в тексте)

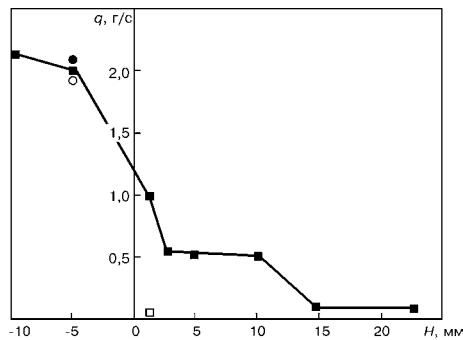


Рис. 5. Изменение интенсивности плавления флюса дугой

тельных значениях величины H с изменением последней характер его плавления факелом 3 (см. рис. 4, а) является нелинейным. В непосредственной близости дуги от флюса интенсивность его плавления q максимальна и быстро уменьшается с ростом расстояния H . При этом застывающий шлак формируется в виде непрерывного валика. При изменении H от 2,5 до 10,0 мм интенсивность плавления флюса, снизившись практически в два раза по сравнению с предыдущим участком, стабилизируется на уровне 0,5 г/с. Застывающий шлак формируется в виде прерывающегося валика, состоящего из длинномерных фрагментов. При дальнейшем увеличении расстояния H интенсивность плавления флюса опять резко снижается, а затем остается постоянной в диапазоне 15...22 мм. Шлак при этом формируется из отдельных застывших фрагментов.

При помещении дуги под слой флюса (отрицательные значения величины H на рис. 5) в его плавлении участвуют в максимальной степени все энергетические факторы дуги. Соответственно в этом случае возрастает и интенсивность расплавления q , увеличиваясь практически в два раза по сравнению со случаем перемещения дуги над флюсом в непосредственной близости от его поверхности. Шлак при этом формируется в виде сплошного валика.

Выделить энергетическую составляющую нагрева флюса, связанную с излучением дуги, можно при перемещении последней над флюсом в соответствии с рис. 4, б. При этом факел дуги направлен вверх и в нагреве флюса практически не участвует. Реализация такого опыта показала, что излучением дуги флюс практически не плавится (на рис. 5 это значение q обозначено светлым квадратом). Оплавляются лишь отдельные зерна, попавшие, вероятно, непосредственно в зону столба дуги.

В работе [10] представлена модель плавления флюса, заключающаяся во внедрении в него столба дуги при движении сварочного аппарата со скоростью сварки. При этом происходит «прокачка» флюса через дугу и его плавление. Выявить роль этого фактора в плавлении флюса можно при уменьшении интенсивности «прокачки» через ядро дуги. Для этого при горении дуги под флюсом обеспечили ее перемещение в направлении векторов $\mathbf{v}_{св1}$ и $\mathbf{v}_{св2}$ (см. рис. 1). Движущийся перед дугой графитовый

Concepts of melting of a flux in electric-arc welding under the effect of the arc column radiation have been analysed. It has been experimentally found that the main heat effect is provided by the plume formed in the burning arc. The latter provides a simultaneous force effect showing up in formation of slag flows which transfer heat from the plume to peripheral zones.

электрод (анод в первом случае и катод во втором) раздвигает флюс, экранируя ядро дуги от непосредственного попадания в эту зону новых порций флюса. Результаты экспериментов приведены на рис. 5 кружками (светлые — первый случай, темные — второй). Из него видно, что интенсивность расплавления флюса практически не изменилась. Причиной этого может служить меньшая, чем у факела, поверхность ядра дуги, которая при перемещении дуги во флюсе может взаимодействовать с ним. Поэтому и вклад ядра дуги в плавление флюса мал.

В реальных условиях дуговой сварки под слоем флюса длина столба дуги, рассчитанная с использованием данных о падении напряжения в приэлектродных областях и его распределении в столбе дуги [11] для $U_d = 30...32$ В и плавящихся флюсов АН-348А, ОСЦ-45, составляет всего 1,5...2,5 мм. При такой длине дуги и диаметре проволочного электрода 4...5 мм вклад излучения столба дуги в плавление флюса и «прокачки» через него флюса не может быть существенным.

Выводы

1. Влияние излучения столба дуги в плавлении флюса несущественно.
2. В дуге, горячей между графитовыми электродами, формируется факел, энергетические возможности которого достаточны для интенсивного плавления флюса.
3. Интенсивность плавления флюса определяется не только термическим, но и силовым воздействием факела, который обеспечивает формирование в шлаке потоков, транспортирующих тепло от источника энергии к периферийным зонам.

1. Кирдо И. В. Тепловой баланс сварки под флюсом // Сб. тр. по автоматической сварке под флюсом. — Киев: Изд-во АН УССР, 1948. — Т. 1. — С. 95-128.
2. Гулаков С. В., Носовский Б. И., Темирбек О. Д. Роль теплоты металла сварочной ванны в плавлении флюса // Автомат. сварка. — 1984. — № 12. — С. 2-4.
3. Кузьменко В. Г. Особенности плавления и отвердевания флюса при дуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1999. — № 10. — С. 16-22.
4. Бадьянов Б. Н. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Там же. — № 11. — С. 8-11.
5. Фишкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма: Пер. с нем. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 182 с.
6. Гаген Ю. Г., Таран В. Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 160 с.
7. Щетишина В. И., Лецинский Л. К., Серенко А. Н. Движение жидкого металла в сварочной ванне // Свароч. пр-во. — 1988. — № 4. — С. 31-33.
8. Щетишина В. И., Лецинский Л. К., Ермолов В. П. Влияние скорости сварки комбинированным электродом на перемещение дуги // Там же. — 1987. — № 6. — С. 38-40.
9. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машиностроение, 1951. — 196 с.
10. Кузьменко В. Г. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1998. — № 3. — С. 14-19.
11. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 336 с.

Поступила в редакцию 14.03.2001