

УДК 621.791.927

**Гулаков С. В., Матвиенко В. Н., Ярыза-Стеценко А. В., Матвиенко В. В.,
Псарева И. С.**

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ФЛЮСА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ (НАПЛАВКЕ)

Процесс дуговой сварки (наплавки) под флюсом может быть охарактеризован как смешанный, включающий как дуговую составляющую, так и шлаковую. Данный характер процесса зависит от теплофизических свойств флюсов, параметров режима, геометрии электрода и предопределяет отличия в нагреве и плавлении электродного и основного металлов, формообразовании сварочной ванны и формировании наплавленного валика. От соотношения токов дуги и шунтирования зависят многие характеристики процесса наплавки – стабильность его протекания, производительность, расплавляющее воздействие дуги, вероятность образования дефектов и т. д. Поэтому исследования условий формирования наплавленного слоя металла при широкослойной наплавке и влияние на эти условия доли тока шунтирования является актуальной задачей.

Шунтирование сварочного тока шлаком определяется кроме свойств флюса, геометрией и размерами (формой) шлаковой оболочки, находящейся около дугового пространства и зависящей от схемы и характера плавления флюса.

В настоящее время нет единого мнения о схеме плавления флюса при дуговой сварке (наплавке). Из литературных данных известно [1, 2], что основной вклад в плавление флюса при дуговой сварке вносит энергия излучения столба дуги, при этом с ростом ее длины при повышении напряжения увеличивается объем расплавленного флюса [3]. В соответствии с данными, приведенными в работе [2], «дуга горит в полости, образованной под оболочкой расплавленного флюса выделяющимися газами и парами (рис. 1). Флюс плавится от излучения дуги на стенках полости и стекает вниз на поверхность жидкого металла по достижении температуры жидкотекучести. Здесь происходит химическое взаимодействие металла и флюса с выделением газов, которые поддерживают эластичную пленку флюса в поднятом положении».

Цель данной работы – изучить условия плавления флюса, оценить условия шунтирования им сварочного тока расплавленным флюсом и долю этого тока при дуговой сварке (наплавке).

В указанной модели дуга рассматривается как совокупность двух источников нагрева – точечного или, точнее, источника, распределенного по площади круга, равного площади анодного или катодного пятна, и линейного (цилиндрического), распределенного по поверхности столба дуги [4].

Под действием первого источника происходит нагрев и плавление электрода и основного металла. Приблизительно можно считать, что мощность, выделившаяся на электроде, идет на плавление, перегрев и испарение металла электрода. Под действием второго источника происходит плавление флюса. При этом флюс плавится за счет излучения столба дуги на оболочку газового пузыря, охватывающего дугу [2].

Однако практика показывает, что на характер плавления флюса влияют и другие факторы, не зависящие от длины и мощности излучения дуги. Так при сварке листов встык на флюсовой подушке количество расплавленного флюса с обратной стороны шва значительно и может быть соизмеримо с объемом шлака, расплавленного с лицевой стороны.

Поскольку роль столба дуги в плавлении флюса с обратной стороны листов ограничена, то, вероятно, имеются иные механизмы его плавления.

Отсутствует связь между температурой столба дуги и относительной массой расплавленного шлака, в то время как, известно, что теплоотдача излучением пропорциональна четвертой степени температуры излучения. В работе [3] опубликованы данные о том, что увеличение

сварочного тока с 300 до 800 А (температура столба дуги повышается на 750 °С) приводит не к возрастанию, а к значительному уменьшению относительной массы шлака. Рост напряжения дуги, практически не влияющий на ее температуру, вызывает существенное приращение эффективности плавления флюса.

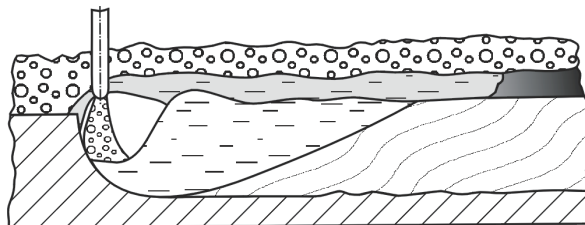


Рис. 1. Схема процесса сварки под флюсом [2]

Известны и иные попытки создания модели, описывающей процесс плавления флюса при дуговой сварке. В работе [5] высказано предположение, что в нагреве и плавлении флюса участвуют также и контактирующие с ним высокоскоростные плазменные и газовые потоки, температура которых может достигать порядка десяти и более тысяч градусов. Именно под действием этих потоков жидкий флюс в режиме турбулентного течения отбрасывается

в направлении хвостовой части сварочной ванны [5]. Имеются данные о том, что часть тока при дуговой сварке шунтируется жидким шлаком, а это также может способствовать его нагреву. Считается, что при сварке под флюсом полезное использование тепла электрической дуги достигает 91 %, при этом от 10 до 25 % ее энергии может расходоваться на расплавление и нагрев флюса, и эта доля становится больше с увеличением напряжения, уменьшается с увеличением скорости сварки и не зависит от тока. Соответственно должен изменяться и расход флюса, а именно то его количество, которое переплавляется с образованием шлаковой корки.

В. Г. Кузьменко [6] предложил новую схему плавления флюса (рис. 2). В результате смещения шлака под действием плазменных потоков дуги в последуюющую область возможно обнажение преддуговой кромки плавящегося основного металла; при этом надежное шлаковое укрытие сварочной ванны должно образовываться за кратером дуги за счет растекания шлака по ее поверхности.

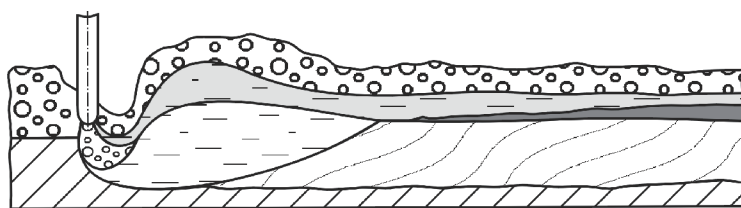


Рис. 2. Новая схема процесса сварки под флюсом [6]

Дуга при перемещении как бы внедряется во флюс, отбрасывая его частично оплавленные и твердые частицы назад от кромки плавящегося металла. При этом последняя обнажается, и в зону горения дуги вместе с зернами флюса, кроме влаги и других примесей, поступает также и воздух. Происходит своеобразная прокачка флюса, вместе с содержащимся в зазорах между зернами воздухом, через дугу. Полноценное шлаковое укрытие сварочной ванны начинает образовываться лишь за кратером дуги в результате растекания жидкого шлака по ее поверхности.

Авторами предлагается рассматривать плавление флюса с учетом влияния основных источников энергии, участвующих в плавлении флюса: дуга; жидкий металл (сварочной ванны и электродный); нагретый вылет электрода и тепло, выделяющееся в жидком шлаке при

прохождении через него доли сварочного тока (ток шунтирования). Интенсивность плавления, как флюса, так и основного металла будет также определяться эффективностью передачи тепла от места его ввода в их глубину. Показана роль металла сварочной ванны в плавлении флюса и экспериментально подтверждено, что на условия плавления флюса оказывает влияние факел, выбрасываемый из зоны активного пятна дуги, а 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. Показано, что излучением столба дуги флюс практически не плавится. В этом случае условия формирования шлаковой оболочки, окружающей дугу, отсутствуют. Тем более ее существование проблематично при нестабильном характере процесса и избыточном непостоянном давлении внутри нее.

Это подтверждает выдвинутое предположение о том, что основная масса расплавленного флюса должна находиться за дугой – после действия источника тепла. Поэтому условия шунтирования сварочного тока расплавленным флюсом должны отличаться от тех представлений, которые были ранее рассмотрены в работах [7–10].

При сварке под флюсом плавящимся электродом во время движения дуги в зону её горения поступают новые порции флюса – она внедряется во флюс [6]. При этом естественным является факт непосредственного его плавления дугой. Однако если условно представить дугу элементарным проводником, соединяющим анод с катодом, то количество флюса, прошедшего в единицу времени через дугу, будет пропорционально поперечному сечению этого проводника, которое равно: $F = d \cdot l$, где d – диаметр столба дуги; l – его длина.

Падение напряжения в приэлектродных областях дуги ($U_A + U_K$), горящей под слоем флюса, например, ОСЦ-45, составляет $23 \div 25$ В. Тогда при напряжении на дуге $30 \div 35$ В её длина будет равна $1,2 \div 2,5$ мм (градиент падения напряжения в столбе дуги принят равным $4,2$ В/мм в соответствии с работой [11]). При диаметре электрода $4 \div 5$ мм с учетом обжатия столба дуги площадь её поперечного сечения будет достаточно мала, чтобы через неё могло быть «прокачено» реальное количество флюса, перешедшего в шлак.

Иная ситуация будет, если дугу рассматривать как сложную систему, состоящую из нескольких потоков заряженных частиц. Так в ряде работ [12, 13] показано наличие анодного и катодного потоков в дуге, причем катодный поток более подвижен и положение этих потоков в пространстве не совпадает.

Доля флюса, расплавленного жидким электродным металлом, вероятно низка из-за малых значений: длины дугового промежутка, времени пролета этим металлом дугового промежутка и поверхности этого металла по сравнению с поверхностью металла ванны.

Вклад нагретого вылета электрода в плавление флюса оценивали после прекращения процесса наплавки путём одновременного отключения сварочного тока, динамического торможения двигателя подачи проволоки и включения механизма подъёма штанги сварочного аппарата. Количество оставшегося на вылете электрода расплавленного шлака в виде тонкой плёнки вблизи его торца было весьма малым и может быть исключено из общего баланса механизмов (путей) плавления флюса.

По данным ряда работ [7, 9, 10] следует, что при сварке (наплавке) под слоем флюса доля тока, протекающего через жидкий шлак, составляет $10 \div 35$ % от общего сварочного тока. Этот фактор может вносить существенный вклад в процесс плавления флюса, вплоть до случая, когда ток, шунтирующий дугу, достигнет такого значения, что она погаснет, и весь сварочный ток будет протекать через шлак, обеспечивая интенсивное плавление новых порций флюса (электрошлаковая сварка).

Как было сказано выше в работе [14] утверждается, что полноценное шлаковое укрытие сварочной ванны начинает образовываться лишь за кратером дуги в результате растекания жидкого шлака по ее поверхности, а процесс плавления флюса происходит за счет его «прокачки» через дуговой разряд [6]. При этом образование шлаковой оболочки перед

движущейся электрической дугой, определяемое теплофизическими свойствами флюса и скоростью сварки, маловероятно; при высоких скоростях сварки шлаковая оболочка может не успевать образовываться, и плавление флюса будет происходить в области сварочной ванны после дуги.

Для оценки этого утверждения авторами выдвинуто предположение – если электрод при движении со скоростью сварки разрушает шлаковую оболочку, то, следовательно, должна уменьшаться величина тока шунтирования, а с уменьшением скорости, когда создаются оптимальные условия для формирования шлаковой оболочки, доля тока шунтирования должна увеличиваться.

Для движущегося источника условий для существования шлаковой оболочки впереди дуги вероятнее всего нет. Такие условия могут сформироваться для источников тепла, движущихся с очень малой скоростью, либо неподвижных. Если рассматривать шлаковую оболочку как сплошную, либо разрушенную, то оценить наличие или ее отсутствие можно, исследуя характер изменения тока шунтирования при различных скоростях наплавки. С увеличением скорости, если шлаковая оболочка разрушается, должна уменьшаться относительная масса шлака. Предполагается, что характер изменения тока шунтирования должен указать на наличие или отсутствие шлаковой оболочки.

С этой целью проведены эксперименты по изучению влияния скорости сварки (наплавки) при сохранении постоянными остальных параметров процесса на характер изменения доли тока, проходящего через расплавленный флюс. Использована усовершенствованная методика исследований [8, 9], которая позволяет путем электрического зондирования межэлектродного промежутка (при напряжении зондирования недостаточном для образования дуги) фиксировать значения тока зондирующего источника в период после мгновенного отключения сварочного источника питания.

Применение скоростного размыкателя и диодного коммутатора позволило осуществить отключение сварочного источника и подключение зондирующего, за весьма короткий промежуток времени, обеспечивающий фиксацию исследуемых параметров с достаточной точностью.

Эксперименты проводили с использованием плавного флюса АН-348А и керамического легирующего флюса типа ЖСН. На стальные пластины размером $250 \times 100 \times 20$ мм осуществляли наплавку валика проволокой Св-08А диаметром 5 мм и электродной лентой сечением $50 \times 0,5$ мм. Параметры режимов наплавки: $U_0 = 32 \div 34$ В, $I_0 = 600 \div 650$ А, ток постоянный, полярность обратная. Скорость наплавки изменяли от 0 до 15 м/ч.

Для ускорения и повышения точности получаемой информации, а также представления ее в удобном для анализа виде и автоматизации процесса обработки результатов экспериментов проводили с использованием ПК, обеспечивающего существенное снижение трудоёмкости и повышение достоверности результатов.

В результате проведенных исследований и расчетов установлено, что при уменьшении скорости наплавки увеличивается ток шунтирования, что отражено на графиках (рис. 3). При использовании флюса АН-348А, обладающего высокой электропроводностью в расплавленном состоянии, в отличие от флюса ЖСН, величина тока шунтирования достигает больших значений.

При неподвижном сварочном автомате ($V_n = 0$) величина тока, проходящего через расплавленный флюс, достигла максимальных значений. На осциллограммах отчетливо прослеживается сложный характер изменения тока зондирующего источника, включающий ветви нарастания и снижения (рис. 4, а). Это можно объяснить динамикой шлаковой оболочки после отключения сварочного источника.

Время его отключения близко к нулю (участок 1–2). При включении зондирующего источника ток $I_{зи}$ резко возрастает (участок 2–3), оставаясь постоянным на участке 3–4. За промежуток времени от точки 1 до точки 3 (0,004 с) исчезает остаточная проводимость

плазмы, а теплофизические характеристики токопроводящего слоя шлака практически не успевают измениться. Значение $I_{зи}$ на участке 3–4 позволяет достоверно оценить величину тока шунтирования.

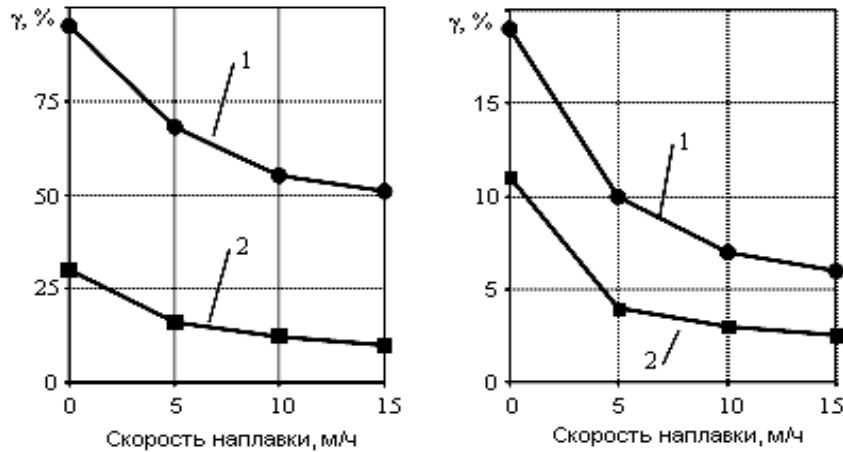


Рис. 3. Влияние скорости наплавки на величину тока, проходящего через расплавленный флюс (g):

1 – флюс АН-348А; 2 – флюс типа ЖСН; а – ленточным электродом; б – проволочным электродом

По мере уменьшения давления в шлаковой оболочке изменяется сечение токопроводящего слоя расплавленного флюса, а также геометрия жидкой прослойки под электродом. Это приводит к значительному возрастанию $I_{зи}$ (участок 4–5). Вместе с тем, снижение температуры и, следовательно, электропроводности шлака способствует уменьшению тока зондирования (участок 5–6).

С увеличением скорости наплавки (особенно при наплавке электродной лентой) характер изменения величины $I_{зи}$ отличается от вышеописанного – отсутствуют ветви нарастания 4–5 и снижения 5–6 (рис. 4, б), что, вероятно, связано с изменением характера плавления флюса и отсутствием шлаковой оболочки.

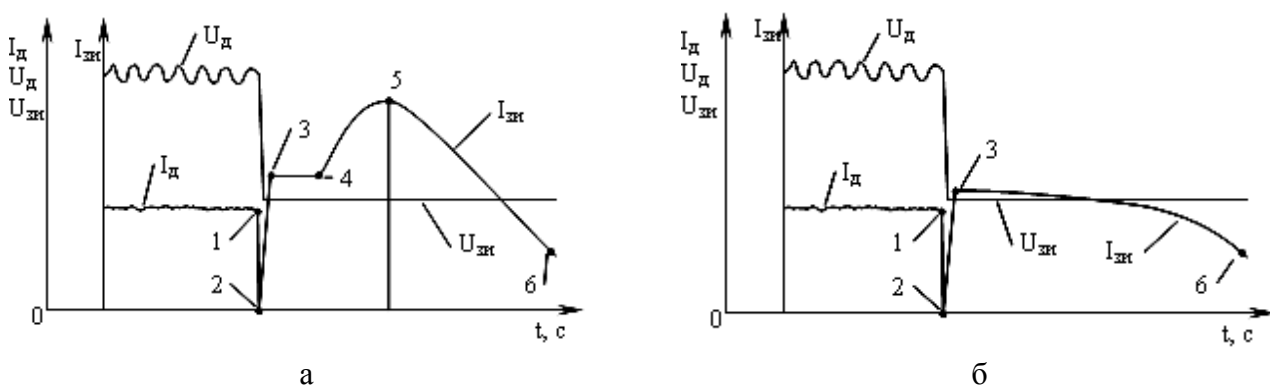


Рис. 4. Осциллограммы процесса электрического зондирования межэлектродного промежутка

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтвердили предположение о том, что характер изменения тока зондирующего источника (рис. 4) существенно меняется в зависимости от скорости сварки (наплавки). Для неподвижного источника и очень редко для источников, движущихся с относительно малой скоростью, когда имеется вероятность существования шлаковой оболочки и есть соответствующие условия для ее создания (интенсивное

плавление флюса, движущийся факел, ванна жидкого металла и др.), характер изменения тока зондирующего источника будет соответствовать рис. 4, а, а с увеличением скорости – рис. 4, б.

Результаты данной работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях в области управления эффективностью и качеством сварки, а также широкослойной наплавки ленточным электродом.

ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние скорости сварки (наплавки) на условия плавления флюса. Представленные результаты свидетельствуют о том, что эффективность плавления флюса световым излучением дуги ничтожно мала.

2. Полученные экспериментальные данные по измерению тока шунтирования позволяют высказать предположение о том, что характер образования шлаковой оболочки определяется теплофизическими свойствами флюса и скоростью сварки (наплавки).

3. Показано, что с увеличением скорости сварки (наплавки) уменьшается ток шунтирования. При этом характер изменения тока зондирующего источника существенно меняется в зависимости от скорости наплавки.

4. Эффективность изменения тока шунтирования больше у ленточного электрода, что позволяет наметить пути управления процессом дуговой широкослойной наплавки, повышения качества и производительности процесса наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрумин И. И. *Технология механизированной наплавки* / И. И. Фрумин, Ю. А. Юзвенко, Е. И. Лейначук. – М. : Высшая школа, 1965. – 304 с.
2. Кирдо И. В. *Тепловой баланс сварки под флюсом* / И. В. Кирдо // *Сборник трудов по автоматической сварке под флюсом*. – К. : АН УССР, 1948. – № 1. – С. 95–128.
3. Фрумин И. И. *О кинетике взаимодействия металла и шлака при сварке под флюсом* / И. И. Фрумин // *Автоматическая сварка*. – 1957. – № 6. – С. 3–18.
4. Макара А. М. *Процесс плавления основного металла при автосварке под флюсом* / А. М. Макара // *Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Патону*. – К. : АН УССР, 1951. – С. 47–94.
5. Кузьменко В. Г. *Определение скорости движения жидкого металла и шлака при дуговой сварке под флюсом* / В. Г. Кузьменко // *Автоматическая сварка*. – 1997. – № 10. – С. 21–25, 31.
6. Кузьменко В. Г. *О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом* / В. Г. Кузьменко // *Автоматическая сварка*. – 1998. – № 3. – С. 14–19.
7. Лецинский Л. К. *Влияние шунтирования дуги расплавленным флюсом на устойчивость процесса наплавки лентой* / Л. К. Лецинский, П. Ф. Лаврик, В. В. Тарасов, В. А. Бесхлебный // *Сварочное производство*. – 1970. – № 6. – С. 7–9.
8. Носовский Б. И. *Особенности процесса дуговой сварки под флюсом* / Б. И. Носовский, Л. К. Лецинский, О. Б. Брайловский, В. Н. Матвиенко // *Автоматическая сварка под флюсом : материалы краткосрочного семинара*. – Ленинград : ЛДНТП, 1981. – С. 47–50.
9. Размышляев А. Д. *Исследование тока, шунтирующего дугу через шлак, при наплавке под флюсом* / А. Д. Размышляев // *Сварочное производство*. – 1982. – № 5. – С. 38–39.
10. Багрянский К. В. *К вопросу о производительности расплавления ленты при электродуговой наплавке под флюсом* / К. В. Багрянский, А. Д. Размышляев, К. А. Нестеренко // *Сварочное производство*. – 1975. – № 3. – С. 42–44.
11. Лесков Г. И. *Электрическая сварочная дуга* / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.
12. Гаген Ю. Г. *Сварка магнитоуправляемой дугой* / Ю. Г. Гаген, В. Д. Таран. – Москва : Машиностроение, 1970. – 160 с.
13. Щетинина В. И. *Влияние скорости сварки комбинированным электродом на перемещение дуги* / В. И. Щетинина, Л. К. Лецинский, В. П. Ермолов // *Сварочное производство*. – 1987. – № 6. – С. 38–40.
14. Кузьменко В. Г. *Особенности плавления и отвердевания флюса при дуговой сварке* / В. Г. Кузьменко // *Сварочное производство*. – 1999. – № 10. – С. 16–22.